

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.132>

**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЛЬДООБРАЗУЮЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕГО РЕАГЕНТА АД-1 С ДОБАВКАМИ НАНОТРУБОК ОКСИДА ЦИНКА (ПЕРЕВОД ОРИГИНАЛЬНОЙ ПУБЛИКАЦИИ НА РУССКИЙ ЯЗЫК)**

Научная статья

**Залиханов М.Ч.<sup>1</sup>, Хучунаев В.М.<sup>2</sup>, Геккиева С.О.<sup>3,\*</sup>, Будаев А.Х.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-5248-521X;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-6606-5996;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-8369-812X;

<sup>4</sup> ORCID : 0000-0003-3481-8663;

<sup>1,2,3,4</sup> Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (sgekkiava[at]list.ru)

**Аннотация**

Перевод оригинальной публикации Gekkiava S.O. LABORATORY TESTS FOR INCREASING THE ICE-FORMING EFFICIENCY OF AD1 CRYSTALLIZING AGENT WITH THE ADDITION OF ZINC OXIDE NANOTUBES / S.O. Gekkiava, V.M. Khuchunaev // Mezhdunarodny' nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2023. — №8 (134). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.134.26.

В статье представлены результаты исследования структур, образующихся при термической возгонке цинка, и льдообразующих свойств штатного пиротехнического состава АД-1 с добавками цинка. АД-1 – это отечественный пиротехнический состав, который используется для оснащения противораковых ракет. Целью экспериментальных исследований является повышение удельного выхода льдообразующих ядер пиротехнического состава АД-1 в диапазоне температур ниже 0 °С. Для достижения поставленной цели в качестве добавок к пиротехническому составу АД-1 использован измельченный порошок цинка с размерами частиц 0,01-0,05 мм. Экспериментальные исследования проводились в большой облачной камере, где создавалась искусственная облачная среда, в которую вносились испытываемые составы. Образующиеся при возгонке частицы оксида цинка осаждались на специальные подложки и изучались под электронным микроскопом. Ледяные кристаллы, образующиеся при взаимодействии частиц реагентов с облачной средой, также осаждались на предметные стекла и изучались в поле оптического микроскопа. Получены значения удельного выхода льдообразующих ядер АД-1 с добавкой цинка, которые значительно превышают удельный выход пиротехнического состава АД-1. При возгонке цинка в сухой камере образуются наночастицы оксида цинка в виде нанотрубок диаметром порядка 30-50 нм, а при возгонке цинка в присутствии водяного пара образуются полые наноструктуры размерами до 300 мкм.

**Ключевые слова:** активные воздействия, пиротехнический состав, реагент, льдообразующие частицы, оксид цинка, наночастицы.

**LABORATORY TESTS OF ICE-FORMING EFFICIENCY ENHANCEMENT OF CRYSTALLISING REAGENT AD-1 WITH ZINC OXIDE NANOTUBE ADDITIVES (TRANSLATION OF THE ORIGINAL PUBLICATION IN RUSSIAN)**

Research article

**Zalikhonov M.C.<sup>1</sup>, Khuchunaev V.M.<sup>2</sup>, Gekkiava S.O.<sup>3,\*</sup>, Budaev A.K.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-5248-521X;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-6606-5996;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-8369-812X;

<sup>4</sup> ORCID : 0000-0003-3481-8663;

<sup>1,2,3,4</sup> High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation

\* Corresponding author (sgekkiava[at]list.ru)

**Abstract**

Translation of the original publication Gekkiava S.O. LABORATORY TESTS FOR INCREASING THE ICE-FORMING EFFICIENCY OF AD1 CRYSTALLIZING AGENT WITH THE ADDITION OF ZINC OXIDE NANOTUBES / S.O. Gekkiava, V.M. Khuchunaev // Mezhdunarodny' nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2023. — №8 (134). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.134.26

The article presents the results of the study of structures formed by thermal sublimation of zinc and ice-forming properties of the standard pyrotechnic composition AD-1 with zinc additives. AD-1 is a domestic pyrotechnic composition, which is used to equip anti-hail missiles. The aim of experimental studies is to increase the specific yield of ice-forming nuclei of the AD-1 pyrotechnic composition in the temperature range below 0 °C. To achieve this objective, as additives to the AD-1 pyrotechnic composition, a crushed zinc powder with particle sizes of 0.01-0.05 mm was used. Experimental studies were carried out in a large cloud chamber, where an artificial cloudy environment was created in which the tested compositions were introduced. The zinc oxide particles formed during ignition were deposited on special substrates and studied under an electron microscope. Ice crystals formed during the interaction of reagent particles with cloudy medium were also deposited on slides and studied in the field of an optical microscope. The values of specific yield of ice-forming nuclei of AD-1 with zinc addition were obtained,

which significantly exceed the specific yield of the pyrotechnic composition AD-1. Zinc oxide nanoparticles in the form of nanotubes with a diameter of about 30-50 nm are formed during zinc ignition in a dry chamber, and hollow nanostructures with sizes up to 300  $\mu\text{m}$  are formed during zinc ignition in the presence of water vapour.

**Keywords:** active effects, pyrotechnic composition, reagent, ice-forming particles, zinc oxide, nanoparticles.

### Введение

Выход активных ядер льдообразующих реагентов зависит от многих факторов: рецептуры состава, конструктивных особенностей генераторов аэрозоля; условий диспергирования реагента и т.д. Эти факторы определяют дисперсность формирующегося аэрозоля, от которого зависит его структура и льдообразующая активность. Повышение дисперсности ведет к росту числа частиц с единицы массы реагента, однако мелкие частицы проявляют льдообразующую активность при очень низкой температуре или в условиях значительного пресыщения водяного пара, которого нет в облаках. Формирование крупных частиц аэрозоля ведет к повышению его активности в требуемом интервале температуры (от  $-5$  до  $-10^\circ\text{C}$ ) без пресыщения водяного пара, но по мере укрупнения частиц снижается выход с 1 грамма реагента. Для компенсации этого недостатка рецептура кристаллизующих реагентов предусматривает формирование льдообразующего аэрозоля, содержащего ядра из продуктов горения, на поверхности которых имеются вкрапления иодида серебра AgI. Повышение содержания AgI приводит к увеличению удельного выхода льдообразующих ядер и повышению устойчивости их льдообразующей эффективности, но это не означает, что выход льдообразующих ядер растет пропорционально содержанию AgI [1], [2], [3], [4].

Иодид серебра обладает хорошими льдообразующими свойствами с высокой эффективностью при температурах ниже  $-6^\circ\text{C}$ . Поэтому и в настоящее время он широко используется в практике активных воздействий на градовые процессы. В ракетном методе активных воздействий, применяемом военными службами Росгидромета, иодид серебра является одним из компонентов пиротехнического состава АД-1.

В связи с тем, что большая часть проектов по активным воздействиям использует пиротехнические составы, содержащие от 2 до 20% иодистого серебра, в последние годы усилия исследователей направлены на изучение возможностей повышения эффективности реагентов на основе AgI путем экспериментального подбора компонентов применительно для каждого конкретного пиротехнического изделия.

Так, в частности, в экспериментальные пиротехнические составы вводится тонко измельченный порошок цинка, который в комплексе с иодидом серебра приводит к образованию льдообразующих частиц с кристаллической решеткой близкой к кристаллической решетке льда.

Перспективным направлением в вопросе повышения льдообразующей эффективности реагента является использование различных химических добавок к основному пиротехническому составу АД-1. В качестве такой добавки предложено использовать тонко измельченный порошок цинка. Оксид цинка при температуре  $906,2^\circ\text{C}$  начинает кипеть и возгоняется, окисляясь в воздухе, что способствует формированию кластеров из нанотрубок оксида цинка. Молекулярные кластеры оксида цинка представляют собой многоядерные комплексные соединения, в основе, которой находится окруженный лигандами остов из атомов цинка. Выбор цинка обусловлен тем, что льдоподобная структура цинка, как и у AgI способствует адсорбции на ее поверхности молекул  $\text{H}_2\text{O}$ .

### Методы и принципы исследования

Как и большинство металлов, цинк окисляется на воздухе, при этом на поверхности металла образуется защитная плёнка из соединений окисленного металла. Эта плёнка препятствует проникновению кислорода вглубь металла и таким образом останавливает дальнейшее окисление металла.

Температура кипения цинка составляет  $906,2^\circ\text{C}$  и в процессе его термического разложения образуется множество активных атомов, создающих агрегаты в виде кластеров из наночастиц. При температурах ниже  $200^\circ\text{C}$  помимо оксида цинка существует пероксид цинка  $\text{ZnO}_2$ . Выше  $200^\circ\text{C}$  стабилен только  $\text{ZnO}$  [5], [6].

Нанокластеры оксида цинка относятся к гидрофильным кластерам, т.е. они могут сорбировать на своей поверхности молекулы окружающей среды, поэтому они окружены оболочкой. На поверхности кластера оксида цинка может быть до нескольких слоев молекул  $\text{H}_2\text{O}$ , что ведет к формированию поверхностной пленки воды с последующим ее замерзанием при достижении критической толщины. В такой пленке образуются микрообъемы с ориентированными молекулами  $\text{H}_2\text{O}$ , приобретающие по мере переохлаждения льдоподобное строение. При достаточном размере эти микрообъемы служат зародышами ледяных кристаллов. «Многофазные» наночастицы оксида цинка не имеют стандартных границ раздела, т.е. понятие фазового или агрегатного состояния неприменимо к ним.

#### 2.1. Фазовая диаграмма системы Zn – O

Полная фазовая диаграмма бинарной системы Zn – O не построена. Существуют отдельные данные о некоторых участках фазовой диаграммы, ее (T-x) сечениях и фазовом переходе в  $\text{ZnO}$  под воздействием внешнего давления [7]. В работе [8] впервые предложено (T-x)-сечение фазовой диаграммы системы Zn – O для конденсированного состояния (см. рис. 1).

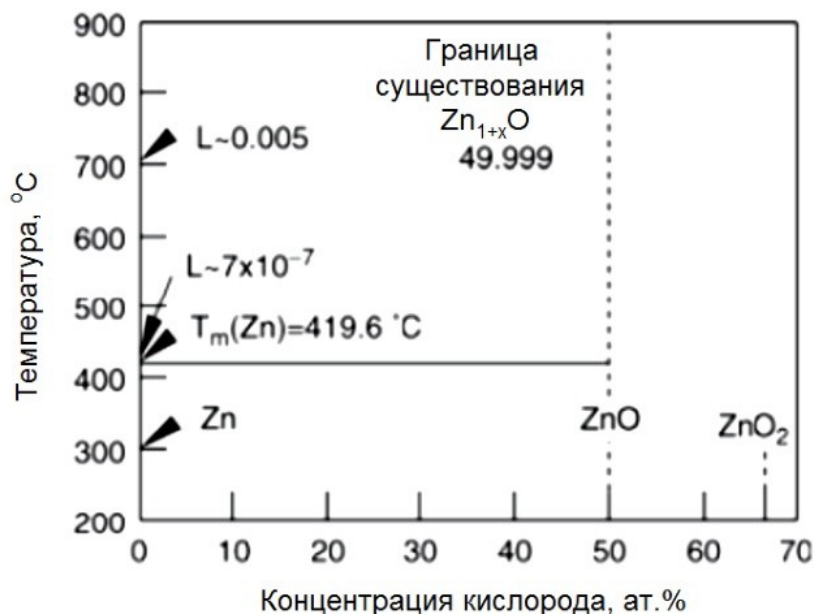
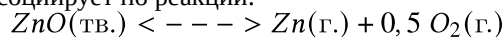


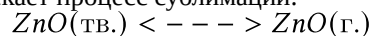
Рисунок 1 - (Т-х)-сечение фазовой диаграммы бинарной системы Zn – O при давлении 0.1 МПа:  
*L* – растворимость кислорода в Zn при разных температурах; *T<sub>m</sub>(Zn)* – температура плавления цинка (419.6°C)  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.132.1>

Примечание: по ист. [5]

При нагревании оксид цинка диссоциирует по реакции:



Одновременно с этим процессом протекает процесс сублимации:



Изучение испарения оксида цинка методом высокотемпературной масс-спектрометрии с применением платиновых и кварцевых эффузионных камер показало, что в области температур 1200 – 1450K пар над ZnO(тв.) состоит из атомов Zn(г.) и молекул O<sub>2</sub>(г.), тогда как молекулы ZnO(г.) обнаружены только при температурах выше 1500K [9]. При 1540K состав парогазовой фазы над ZnO на 99,94% состоит из продуктов диссоциации оксида цинка: Zn(г.) и O<sub>2</sub>(г.). В присутствии избытка паров цинка резко увеличивается скорость испарения оксида цинка (в 10<sup>8</sup> - 10<sup>10</sup> раз) [9]. Авторы [10] объясняют увеличение скорости испарения ZnO в присутствии паров Zn взаимодействием цинка со следовыми количествами H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>, что приводит к образованию H<sub>2</sub> и CO, которые восстанавливают оксид цинка.

## 2.2. Аппаратура для проведения лабораторных исследований

Для проведения полного цикла лабораторных экспериментов использовались: большая облачная камера (рисунок 2), ультразвуковой парогенератор, электронные весы, устройство для возгонки реагента, оптический микроскоп (рисунок 4), электронный микроскоп (рисунок 5), подложки, предметные стекла. Температура в большой облачной камере поддерживалась в интервале от 0 до -15°C.

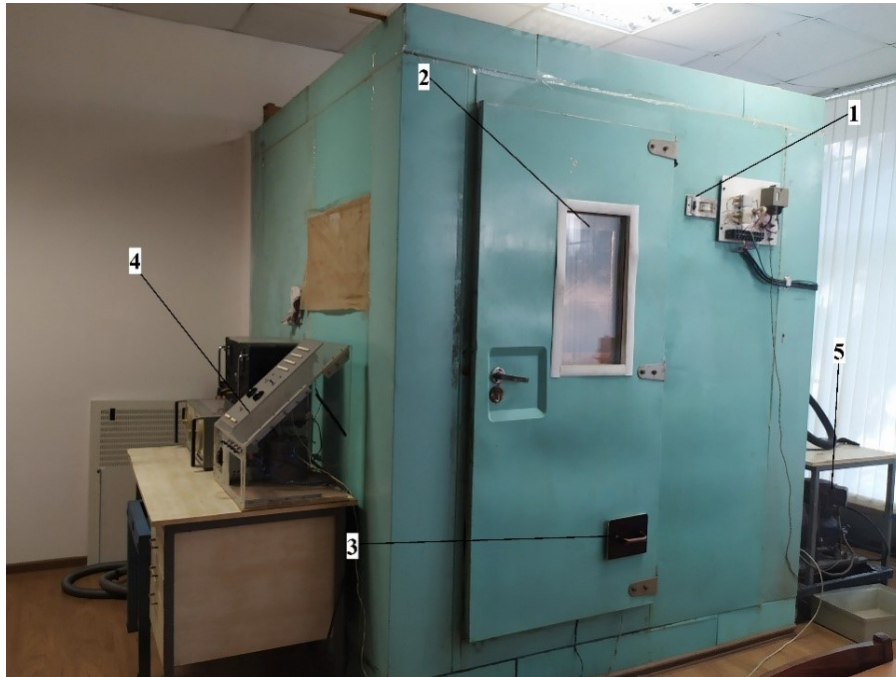


Рисунок 2 - Большая облачная камера для исследования взаимодействия реагента с облачной средой:  
1 – система регулировки температуры; 2 – смотровое окно; 3 – отверстие для смены подложек; 4 – пульт управления;  
5 – холодильный агрегат

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.132.2>

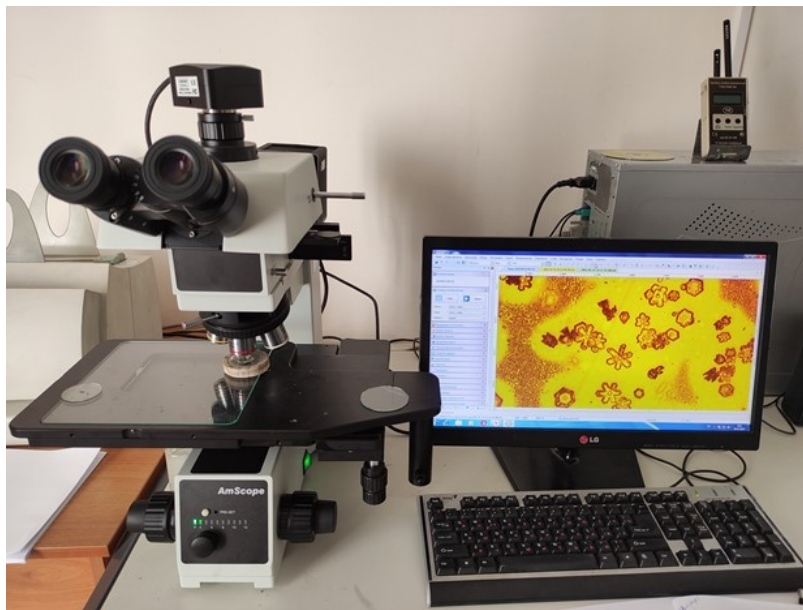


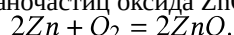
Рисунок 3 - Оптический микроскоп  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.132.3>



Рисунок 4 - Электронный микроскоп  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.132.4>

### 2.3. Методика проведения исследований наноструктур ZnO, полученных в сухой и влажной среде

Предварительно на дне облачной камеры устанавливаются подложки. Определенное количество опытного образца (цинк) закладывается на графитовую подложку устройства для возгонки реагента. В большой камере с помощью ультразвукового парогенератора в камере создается искусственная облачная среда. На контакты графитовой подложки подается ток порядка 100-120А, происходит нагревание подложки до температур 1200-2000°C и возгонка цинка. После чего воздух в камере перемешивается вентиляторами. В камере под воздействием высокой температуры цинк взаимодействует с кислородом с образованием наночастиц оксида ZnO:



Далее происходит осаждение наноструктур оксида цинка на подложки, которые извлекаются из облачной камеры и изучаются под электронным микроскопом.

### 2.4. Методика проведения исследований льдообразующих свойств пиротехнического состава АД-1 с добавками цинка

На дне облачной камеры устанавливаются предметные стекла, которые накрываются крышками. Определенное количество АД-1 или АД-1 с добавками цинка взвешивается на электронных весах и закладывается на графитовую подложку устройства для возгонки реагента. Большая камера охлаждается до заданной температуры, в камере создается искусственная облачная среда. На контакты графитовой подложки подается ток, происходит возгонка пиросостава. После чего воздух в камере перемешивается вентиляторами. При появлении в поле зрения первых кристаллов льда предметные стекла открывают по очереди. После выпадения кристаллов стекла извлекают и изучают в поле оптического микроскопа.

Выход ядер кристаллизации для каждой пробы рассчитывали по методике [11].

Количество кристаллов в камере определяли исходя из количества кристаллов, осажденных на предметном стекле:

$$n_{кр.} = (S_{б.к.}/S_{кадра}) * n_{подл.} \quad (1)$$

где  $n_{кр.}$  – среднее количество кристаллов на единицу площади;  $S_{б.к.}$  – площадь большой облачной камеры;  $S_{кадра.}$  – площадь кадра на микроскопе;  $n_{подл.}$  – количество кристаллов на подложке.

Далее, удельный выход «А» определяли расчетным путем по формуле:

$$A = n_{кр.}/m_{реаг.} \quad (2)$$

где  $n_{кр.}$  – количество кристаллов в большой облачной камере;  $m_{реаг.}$  – масса реагента.

Основная погрешность методики складывается из систематической и случайной составляющих.

Систематическая составляющая основной погрешности обусловлена потерями частиц возгонки (их коагуляцией и осаждением) во время возгонки в облачной камере и наличием неустраняемых температурных градиентов в рабочем объеме облачной камеры, приводящих к активации части льдообразующих ядер при температуре, отличной от температуры опыта, регистрируемой в центре облачной камеры. При обычной продолжительности возгонки 1 мин суммарные потери частиц с начальной концентрацией менее  $10^8 \text{ см}^{-3}$  и размерами менее  $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ , согласно экспериментальной оценке, не превышают 5%. Систематическая составляющая основной погрешности, связанная с наличием градиентов температуры в облачной камере, зависит от вида температурной зависимости выхода  $N(t)$  и при температурных градиентах менее  $0,03 \text{ °C/см}$  не превышает 5% для тех участков  $N(t)$ , где выход  $N$  мало меняется с температурой, увеличиваясь до 25% вблизи температурного порога активности реагента.

Случайная составляющая основной погрешности складывается из погрешности в определении исходной массы переводимого в аэрозоль реагента; погрешности определения числа активных частиц (ледяных кристаллов);

погрешности измерения температуры переохлажденного тумана. Для наиболее типичных участков температурной зависимости выхода кристаллов суммарная погрешность составляет  $\pm(10...20)\%$ .

#### **Некоторые результаты исследования наноструктур ZnO, полученных в сухой и влажной среде**

При возгонке цинка в сухой камере образуются наночастицы оксида цинка в виде нанотрубок диаметром порядка 30-50 нм и длиной несколько мкм. На рисунке 5 показан кластер из полых нанотрубок оксида цинка, полученный в сухой среде.

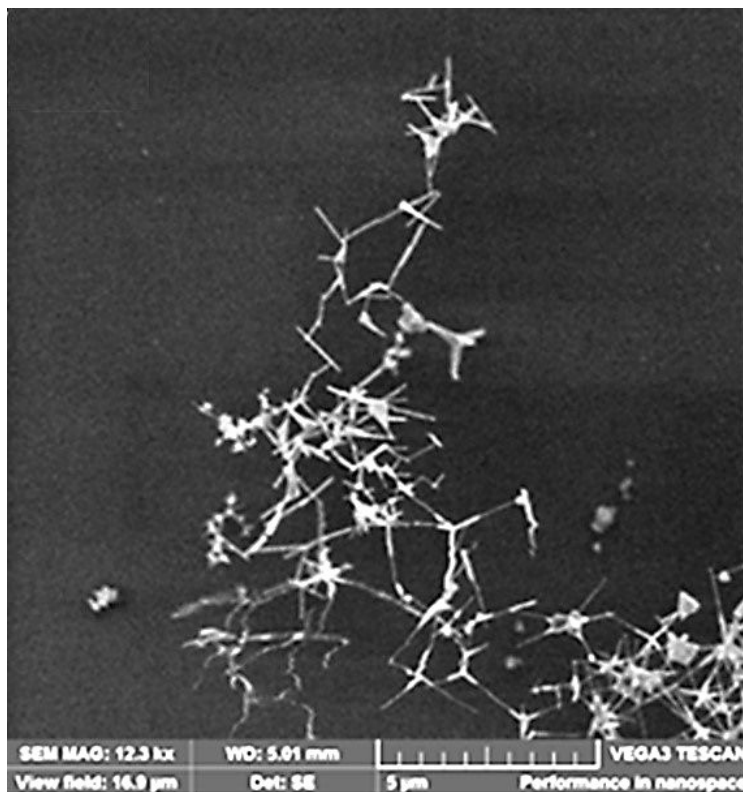


Рисунок 5 - Кластер из нанотрубок, полученный, полученный в сухой среде  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.132.5>

При возгонке цинка в присутствии водяного пара образуются полые наноструктуры (размерами до 300 мкм), образование которых зависит от влажности камеры. При малых влажностях наноструктуры образуются в большом количестве, а с увеличением влажности исчезают.

Наноструктуры оксида цинка состоят из нанотрубок, размеры которых составляют 1-5 нм. На рисунке 6 показана фотография кластера из нанотрубок оксида цинка, полученная на электронном микроскопе.

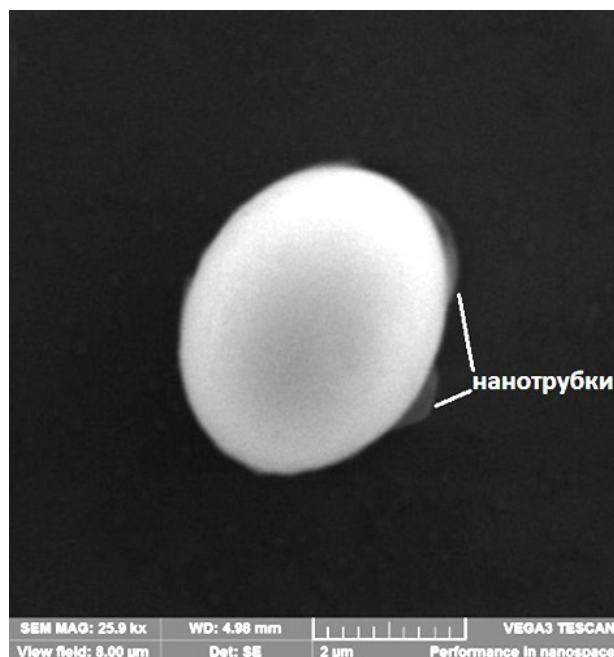


Рисунок 6 - Кластер из нанотрубок оксида цинка, полученный в среде водяного пара  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.132.6>

В таблице 1 представлены результаты лабораторных исследований льдообразующей составляющей основного пиротехнического состава АД-1 при различной температуре.

Таблица 1 - Результаты испытаний льдообразующей составляющей АД-1 при различной температуре  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.132.7>

Температура, °С	Реагент АД-1, г	Удельный выход, г <sup>-1</sup>
-6,8	0,01	$6,5 \cdot 10^{11}$
-7,0	0,01	$5,3 \cdot 10^{12}$
-7,2	0,01	$5,3 \cdot 10^{12}$
-7,3	0,01	$2,1 \cdot 10^{12}$
-7,5	0,01	$3,2 \cdot 10^{11}$
-8,2	0,01	$3,3 \cdot 10^{12}$
-8,7	0,01	$1,3 \cdot 10^{12}$
-9,4	0,01	$1,6 \cdot 10^{12}$
-9,7	0,01	$6,4 \cdot 10^{12}$
-9,8	0,01	$2,3 \cdot 10^{12}$
-10,2	0,01	$1,2 \cdot 10^{12}$
-10,6	0,01	$1,2 \cdot 10^{12}$
-11,9	0,01	$5,7 \cdot 10^{11}$
-13,4	0,01	$4,4 \cdot 10^{12}$

В лабораторных исследованиях был использован тонкодисперсный порошок цинка, который вводили в исходный пиротехнический состав АД-1 в соотношении к общей ее массе – соответственно 3%, 6% и 9%. Получено, что наиболее высокой активностью обладает опытный реагент АД-1 с добавками цинка в количестве 6% от общей массы пиротехнического состава. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Средние значения выхода ядер кристаллизации льдообразующей составляющей АД-1 с добавкой цинка (6%) при различной температуре

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.132.8>

Температура, °С	Реагент АД+1 с цинком (6%)	Удельный выход, г <sup>-1</sup>
-5,0	0,00052	$1,8 \cdot 10^{13}$

-4,2	0,00052	$1,2 \cdot 10^{13}$
-3,4	0,00052	$1,0 \cdot 10^{13}$
-2,2	0,00052	$1,2 \cdot 10^{13}$
-2,0	0,00052	$4,0 \cdot 10^{12}$
-1,6	0,00052	$4,7 \cdot 10^{12}$
-1,1	0,00052	$9,0 \cdot 10^{12}$
-1,0	0,00052	$6,6 \cdot 10^{12}$
-11,2	0,01	$9,0 \cdot 10^{13}$
-10,6	0,01	$5,4 \cdot 10^{13}$
-10,4	0,01	$1,4 \cdot 10^{14}$
-10,2	0,01	$6,3 \cdot 10^{13}$
-10,0	0,01	$6,0 \cdot 10^{13}$
-9,6	0,01	$5,2 \cdot 10^{13}$
-7,5	0,01	$6,9 \cdot 10^{13}$

В таблице 3 представлены результаты лабораторных исследований льдообразующей эффективности состава АД-1 с различными массовыми концентрациями цинка.

Таблица 3 - Удельный выход частиц реагента АД-1 с добавлением цинка

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.132.9>

t, °C	-11	-9	-7	-5
C <sub>Zn</sub> , %	Удельный выход, г <sup>-1</sup>	Удельный выход, г <sup>-1</sup>	Удельный выход, г <sup>-1</sup>	Удельный выход, г <sup>-1</sup>
0	$3,2 \cdot 10^{12}$	$2,7 \cdot 10^{12}$	$2,5 \cdot 10^{12}$	$6,5 \cdot 10^{11}$
1	$8,8 \cdot 10^{12}$	$7,0 \cdot 10^{12}$	$5,6 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{12}$
2	$1,5 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$8,2 \cdot 10^{12}$	$4,5 \cdot 10^{12}$
3	$2,8 \cdot 10^{13}$	$2,2 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	$7,2 \cdot 10^{12}$
4	$4,6 \cdot 10^{13}$	$3,6 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{13}$	$9,5 \cdot 10^{12}$
4,7	$6,5 \cdot 10^{13}$	$5,2 \cdot 10^{13}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$
5	$7,0 \cdot 10^{13}$	$5,9 \cdot 10^{13}$	$3,0 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^{13}$
5,5	$7,3 \cdot 10^{13}$	$6,2 \cdot 10^{13}$	$3,3 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^{13}$
6	$7,5 \cdot 10^{13}$	$6,3 \cdot 10^{13}$	$3,4 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{13}$
6,6	$6,5 \cdot 10^{13}$	$5,2 \cdot 10^{13}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{13}$
7	$5,2 \cdot 10^{13}$	$4,3 \cdot 10^{13}$	$1,9 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^{13}$
8	$3,4 \cdot 10^{13}$	$3,0 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^{13}$	$7,2 \cdot 10^{13}$
9	$2,2 \cdot 10^{13}$	$1,9 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^{13}$	$5,3 \cdot 10^{13}$

Примечание: в верхней строке показан удельный выход частиц реагента АД-1 при заданных температурах. Удельный выход частиц реагента в зависимости от концентрации оксида цинка представлен на рисунке 7.



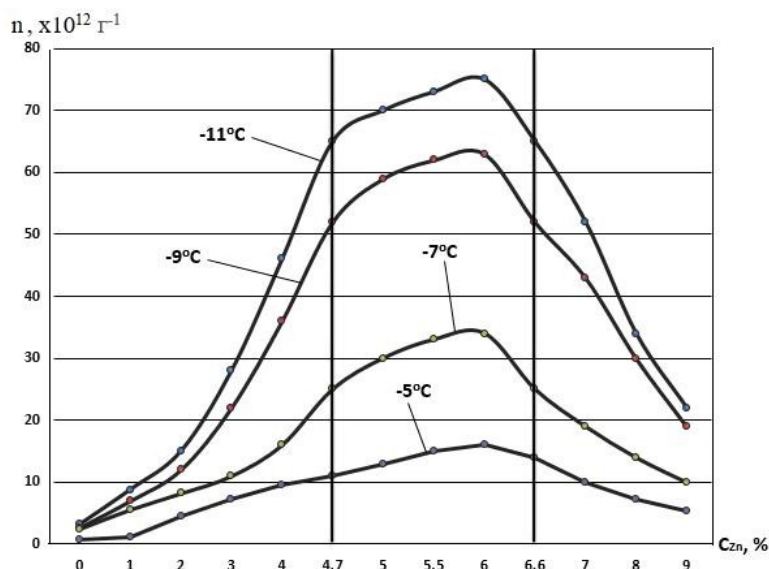


Рисунок 7 - Зависимость удельного выхода льдообразующих частиц от концентрации цинка в пиросоставе АД-1 для разного уровня температур  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.132.10>

На графике видно, что наиболее максимальный выход льдообразующих частиц обеспечивается в интервале концентраций цинка 4,7–6,6 масс.%. Соответствующая область на графике выделена вертикальными линиями.

Многочисленными опытами установлено, что при добавлении в состав исходного льдообразующего топлива АД-1 мелкодисперсного порошка цинка в соотношении к общей массе состава 6%, повышает выход льдообразующих частиц в диапазоне температур от 0 до минус 14°C.

Повышение выхода активных льдообразующих частиц в диапазоне исследуемых температур объясняется тем, что в процессе термического разложения оксида цинка образуется множество активных атомов, создающих агрегаты в виде кластеров из нанотрубок оксида цинка ZnO. Они являются основой, на которой укладываются молекулы воды, образуя кристаллы льда. Таким образом, добавление к основному пиротехническому составу тонко измельченного порошка цинка обеспечивает значительное повышение льдообразующей эффективности реагента в области температур от 0 до минус 14°C.

В определении эффективности кристаллизующих реагентов экологическая чистота имеет большое значение. Предложенный в качестве добавки к основному пиротехническому составу порошок оксида цинка известен своими антибактериальными свойствами с незапамятных времен [12]. Он использовался во времена правления фараонов, и исторические записи показывают, что оксид цинка использовался во многих мазях для лечения травм и фурункулов даже в 2000 году до нашей эры [13]. Он по-прежнему используется в солнцезащитных кремах, в качестве добавки, фотопроводящего материала, светодиодов, прозрачных транзисторов, солнечных элементов, устройств памяти, косметики и катализаторах [7], [14].

### Заключение

Полученные результаты лабораторных испытаний показали, что наличие в составе исходного льдообразующего топлива АД-1 мелкодисперсного порошка цинка в соотношении к общей массе состава 6%, резко повышает выход льдообразующих частиц во всем диапазоне принятых температур. При этом, выход льдообразующих частиц при температуре минус 12°C возрастает почти на порядок, а в интервале температур от минус 2°C и до минус 4°C – почти в два раза.

Выявлено, что льдообразующие свойства кластеров оксида цинка зависят от условий окружающей среды, где производится возгонка. При возгонке в сухой камере образуются кластеры оксида цинка диаметром порядка 30-50 нм [11]. При возгонке в большой облачной камере в присутствии водяного пара и при отрицательных температурах образуются кластеры оксида цинка размерами от 50 нм до 10 мкм, которые имеют полую структуру и состоят из множества нанотрубок диаметром 1-5 нм.

Кластеры оксида цинка, образованные при возгонке в сухой среде, не обладают льдообразующими свойствами, тогда как кластеры, образованные при возгонке цинка в присутствии водяного пара, обладают хорошими льдообразующими свойствами с удельным выходом до 10<sup>13</sup> г<sup>-1</sup>.

На основе исходного льдообразующего топлива АД-1 разработана методика получения эффективного пиротехнического состава для оснащения метеорологических ракет, предназначенных для активных воздействий на грозоградовые облака с целью искусственного увеличения жидких осадков и борьбы с градом.

Данный состав может быть использован также при создании перспективных наземных генераторов для активных воздействий на переохлажденные туманы с целью обеспечения благоприятных метеорологических условий для функционирования космодромов, аэропортов и дорожно-транспортных коммуникаций.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Абшаев А.М. Руководство по организации и проведению противоголовоградных работ / А.М. Абшаев, М.Т. Абшаев, М.В. Бареева [и др.] — Нальчик, 2014. — С. 219.
2. Vonnegut B. Experiments with silver-iodide smokes in the natural atmosphere / B. Vonnegut // Bull.Amer.Meteor.Soc. — 1950. — Vol. 31.
3. Никандров В.Я. Искусственные воздействия на облака и туманы / В.Я. Никандров. — Л.: Гидрометеиздат, 1959. — С. 271.
4. Закинян Р.Г. Кинетика роста льда на поверхностях предметов различных форм, помещенных в поток переохлажденного аэрозоля / Р.Г. Закинян // Материалы V научно-технической конференции СК ГТУ. — 2001. — С. 20.
5. Жариков В.А. Основы физико-химической петрологии / В.А. Жариков. — М.: МГУ, 1976.
6. Внукова Н.Г. Наноматериалы и нанотехнологии / Н.Г. Внукова, Г.Н. Чурилов. — Красноярск: СФУ, 2007. — С. 103.
7. Özgür Ü. A comprehensive review of ZnO materials and devices / Ü. Özgür, Ya.I. Alivov, C. Liu et al. // J. Appl. Phys. — 2005. — Vol. 98. — P. 041301.
8. Wriedt H.A. The O-Zn (Oxygen-Zinc) System / H.A. Wriedt // J. Phase Equilib. — 1987. — Vol. 8. — № 2. — P. 166-167.
9. Казенас Е.К. Испарение оксидов / Е.К. Казенас, Ю.В. Цветков. — М.: Наука, 1997. — 543 с.
10. Anthrop D.F. Sublimation and Thermodynamic Properties of Zinc Oxide / D.F. Anthrop, A.W. Searcy // J. Phys. Chem. — 1964. — Vol. 68. — P. 2335-2342.
11. Khuchunaev B.M. Researches of ice-forming efficiency of products of sublimation of pyrotechnic compositions consisting of silver iodide AgI particles and zinc oxide / B.M. Khuchunaev, Kh.-M.Kh. Baysiev, S.O. Gekkieva et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021.
12. Roselli M. Zinc oxide protects cultured enterocytes from the damage induced by Escherichia coli / M. Roselli, A. Finamore, I. Garaguso et al. // J Nutr. — 2003. — № 133. — P. 4077-4082.
13. Sawai J. Quantitative evaluation of antibacterial activities of metallic oxide powders (ZnO, MgO and CaO) by conductimetric assay / J. Sawai // J Microbiol Methods. — 2003. — № 54. — P. 177-182.
14. Brahms J. Dry deodorant containing a sesquiterpene alcohol and zinc oxide / J. Brahms, J. Mattai, R. Jacoby et al. — 2005.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Abshaev A.M. Rukovodstvo po organizacii i provedeniyu protivogorodovykh rabot [Guidelines for the organization and conduct of anti-hail works] / A.M. Abshaev, M.T. Abshaev, M.V. Barekova [et al.] — Nalchik, 2014. — P. 219. [in Russian]
2. Vonnegut B. Experiments with silver-iodide smokes in the natural atmosphere / B. Vonnegut // Bull.Amer.Meteor.Soc. — 1950. — Vol. 31.
3. Nikandrov V.Ya. Iskusstvennyye vozdejstviya na oblaka i tumany [Artificial effects on clouds and fogs] / V.Ya. Nikandrov. — L.: Hydrometeoizdat, 1959. — P. 271. [in Russian]
4. Zakinyan R.G. Kinetika rosta l'da na poverhnostyah predmetov razlichnykh form, pomeshchennykh v potok pereohlazhdennogo aerolya [Kinetics of ice growth on surfaces of objects of various shapes placed in a supercooled aerosol stream] / R.G. Zakinyan // Materialy V nauchno-tekhnicheskoy konferencii SK GTU [Materials of the V Scientific and technical Conference of SC GTU]. — 2001. — P. 20. [in Russian]
5. Zharikov V.A. Osnovy fiziko-himicheskoy petrologii [Fundamentals of physico-chemical petrology] / V.A. Zharikov. — Moscow: MSU, 1976. [in Russian]
6. Vnukova N.G. Nanomaterialy i nanotekhnologii [Nanomaterials and nanotechnologies] / N.G. Vnukova, G.N. Churilov. — Krasnoyarsk: SFU, 2007. — P. 103. [in Russian]
7. Özgür Ü. A comprehensive review of ZnO materials and devices / Ü. Özgür, Ya.I. Alivov, C. Liu et al. // J. Appl. Phys. — 2005. — Vol. 98. — P. 041301.
8. Wriedt H.A. The O-Zn (Oxygen-Zinc) System / H.A. Wriedt // J. Phase Equilib. — 1987. — Vol. 8. — № 2. — P. 166-167.
9. Kazenas E.K. Isparenje oksidov [Evaporation of oxides] / E.K. Kazenas, Yu.V. Tsvetkov. — М.: Наука, 1997. — 543 p. [in Russian]
10. Anthrop D.F. Sublimation and Thermodynamic Properties of Zinc Oxide / D.F. Anthrop, A.W. Searcy // J. Phys. Chem. — 1964. — Vol. 68. — P. 2335-2342.
11. Khuchunaev B.M. Researches of ice-forming efficiency of products of sublimation of pyrotechnic compositions consisting of silver iodide AgI particles and zinc oxide / B.M. Khuchunaev, Kh.-M.Kh. Baysiev, S.O. Gekkieva et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021.

12. Roselli M. Zinc oxide protects cultured enterocytes from the damage induced by Escherichia coli / M. Roselli, A. Finamore, I. Garaguso et al. // J Nutr. — 2003. — № 133. — P. 4077–4082.
13. Sawai J. Quantitative evaluation of antibacterial activities of metallic oxide powders (ZnO, MgO and CaO) by conductimetric assay / J. Sawai // J Microbiol Methods. — 2003. — № 54. — P. 177–182.
14. Brahms J. Dry deodorant containing a sesquiterpene alcohol and zinc oxide / J. Brahms, J. Mattai, R. Jacoby et al. — 2005.