

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Научно-производственное объединение «Тайфун»  
(ФГБУ «НПО «ТАЙФУН»)

**УТВЕРЖДАЮ**

Первый зам. генерального директора  
ФГБУ «НПО «Тайфун», канд. физ.- мат.  
наук

\_\_\_\_\_ В.Н. Иванов

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

**ОТЧЕТ**

**ИСПЫТАНИЕ НА ЛЬДООБРАЗУЮЩУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛИ  
ЖИДКОСТНОГО НАЗЕМНОГО ГЕНЕРАТОРА, ПЛПНИРУЮЩЕГОСЯ К  
ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В ПРОЕКТЕ**

***«Design and implementation of an Artificial Rainfall Enhancement Project, Phase I»***

Проведение экспериментальных исследований в области моделирования процессов  
в облачных средах и активного воздействия на них на базе модернизированных  
уникальных установок аэрозольного корпуса

Шифр темы .....

Зам. директора ИЭМ ФГБУ «НПО «Тайфун»  
по научной работе, д-р физ.-мат. наук

А.Ф. Нерушев

Ответственный исполнитель НИР,  
зав. отделом ИЭМ, канд. физ.-мат. наук

А.В. Савченко

Обнинск 2012

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель НИР,  
первый зам. ген. директора  
ФГБУ «НПО «Тайфун» –  
директор ИЭМ, канд. физ.- мат.  
наук, доцент

В.Н. Иванов

Ответственный исполнитель  
НИР, зав. отделом, канд. физ.-  
мат. наук, доцент

А.В. Савченко

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.  
наук

А.Г. Шилин

Инженер

А. И. Федоренко (разделы 1, 2)

Инженер

С.В. Тихонов (разделы 1, 2)

Техник

М.С. Семин (разделы 1, 2)

Научный сотрудник

Д.И. Бусыгина (оформление  
отчета)

Нормоконтролер

Л.Н. Жарова

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....	6
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	8
ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ .....	12
ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	13

## ВВЕДЕНИЕ

В рамках темы .... в период 01.10.2012 - 01.12.2012 проведено изготовление полнофункциональной модели наземного аэрозольного жидкостного генератора льдообразующих аэрозолей и произведено ее тестирование на стенде ГАТ ФГБУ «НПО «ТАЙФУН».

Первоначально предполагалось проведение тестирования оригинального наземного генератора (производства Чили) проекта *«Design and implementation of an Artificial Rainfall Enhancement Project, Phase I»* (рис 1), однако в связи с тем, что сам генератор представляет собой объемную и массивную конструкцию весом более 200 кг. (только бак с рабочим раствором имеет вместимость более 100 – 120 л) и стоимость его транспортировки из Чили значительно превышает размер денежных средств, имеющихся в распоряжении заказчика, принято решение провести тестирование его полнофункциональной модели.



Рис 1. Наземный аэрозольный генератор льдообразующего аэрозоля производства Чили.

При этом модель изготавливается из материалов исполнителя и должна воспроизводить следующие параметры оригинала:

- состав рабочего раствора и чистоту используемых реагентов:

- ❖ йодистое серебро: квалификация реактива «Химически Чистый», сумма всех примесей не превышает 1.0E-03 %, содержание металлического серебра не менее 45.7%
- ❖ йодистый калий: класс чистоты «Химически Чистый», сумма всех примесей не превышает 1.0E-03 %,
- ❖ ацетон: температура кипения 56°C
- ❖ состав рабочего раствора:
  - ацетон - 1 литр
  - йодистое серебро - 1.8 г.
  - йодистый калий - 0.72 г.
- рабочее давление в емкости подачи раствора 1.4 ÷ 1.7 атм
- расхода рабочего раствора 4.5 литра/час
- параметры камеры сгорания и форсунки, обеспечивающей подачу раствора в камеру сгорания должны соответствовать документации, переданной заказчиком.

В соответствии с переданной документацией в ФГБУ «НПО «ТАЙФУН» изготовлена модель наземного генератора следующей комплектации (рис 2,3):

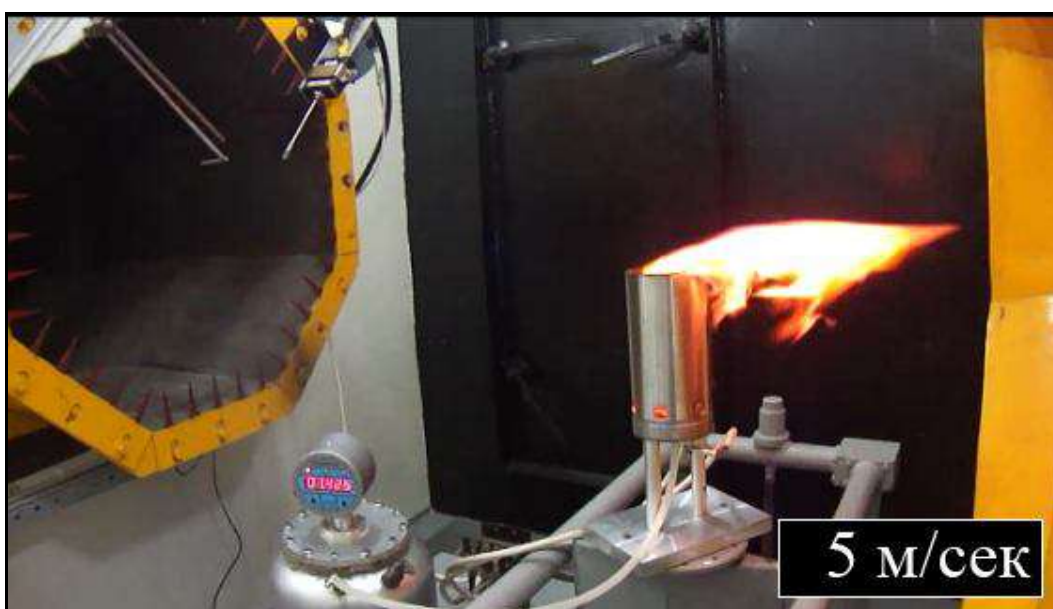
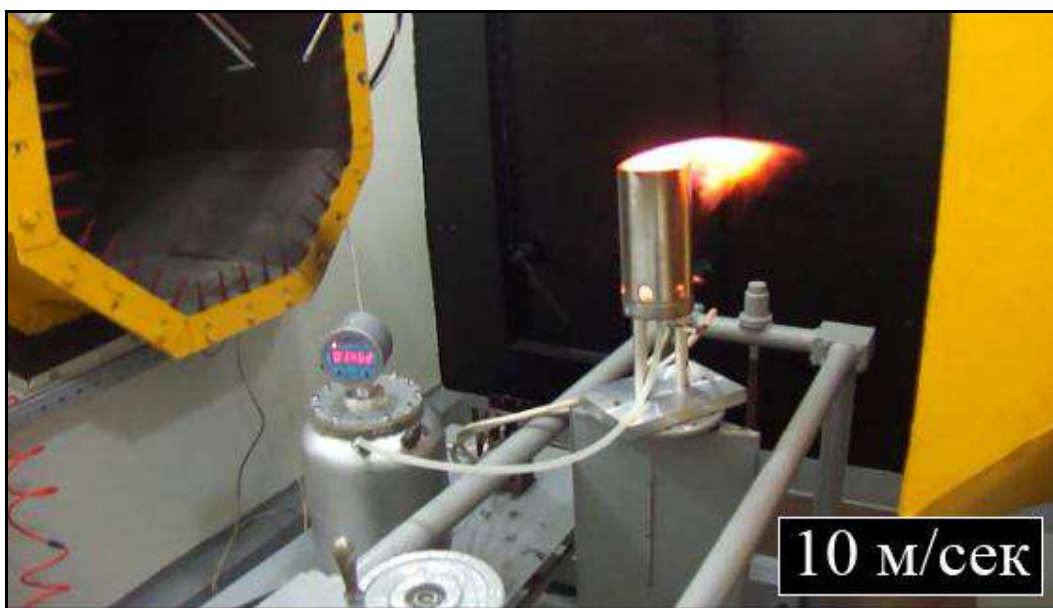
1. Воздушный компрессор, максимальное давление 2 атм
2. Бак с раствором, 20 литров, максимальное давление 20 атм
3. Электронное реле давления, точность установки давления 1.1 атм
4. Камера сгорания диаметр 12 см
  - высота 20 см
  - на расстоянии 2 см от основания расположены 6 отверстий диаметром 1.8 см
  - материал камеры – нержавеющая сталь
5. Расход рабочего раствора в камере сгорания 4.5 ±0.1 литра в час



Рис 2 Модель наземного генератора ФГБУ «НПО «Тайфун»

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В соответствие с пожеланиями заказчика модель наземного аэрозольного генератора тестировалась в условиях обдува потоком ГАТ со скоростями 2, 5, 10 м/сек (рис 3-5). Точность установки скорости потока составила  $\pm 0.2$  м/сек в соответствии с документацией.



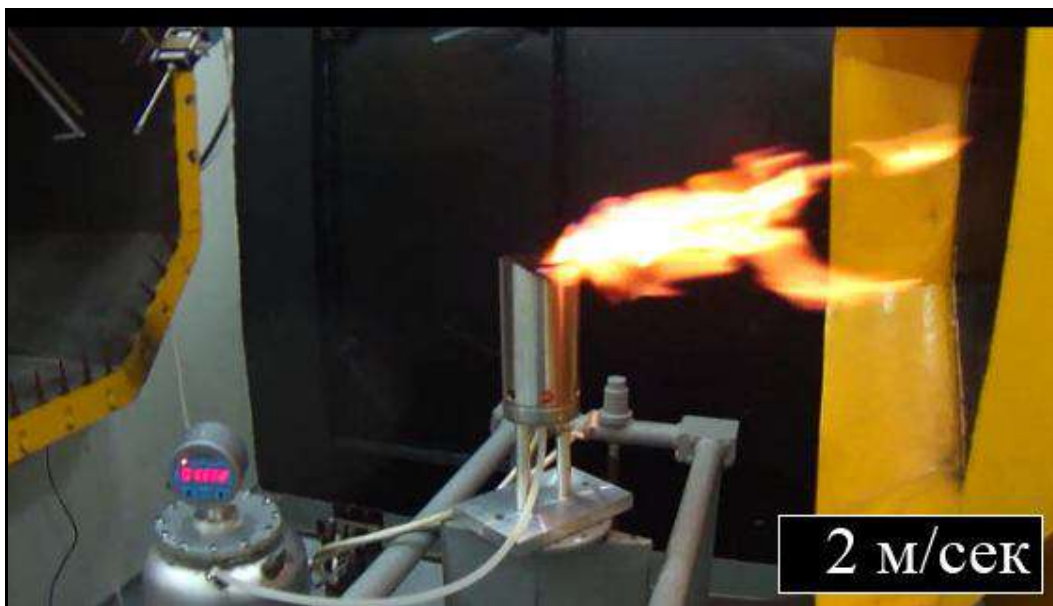


Рис 3-5 Модель наземного аэрозольного генератора на стенде ГАТ при скоростях обдува 10, 5 и 2 м/с

Результаты исследования представлены в протоколе «ИСПЫТАНИЯ НА ЛЬДООБРАЗУЮЩУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛИ ЖИДКОСТНОГО НАЗЕМНОГО ГЕНЕРАТОРА, ПЛПНИРУЮЩЕГОСЯ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В ПРОЕКТЕ *«Design and implementation of an Artificial Rainfall Enhancement Project, Phase I»*

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поскольку в ФГБУ «НПО «Тайфун» данный тип генераторов ранее не исследовался (в 1986 - 1991 г.г. проводились исследования аэрозольного ацетонового генератора в самолетном исполнении, разрабатываемого УКРНИИГМИ), оценку полученных результатов целесообразно провести, используя данные работ [1,2]. Наиболее близок к рассматриваемой системе генератор, описанный в работе 1, вариант исследования в отсутствие внешнего обдува (natural draft). Сравнивая полученные нами данные с данными работы 1 в сопоставимых единицах измерения (эффективность рассчитана как количество



активных льдообразующих ядер с 1 грамма йодистого серебра) получаем следующее (рис.6).

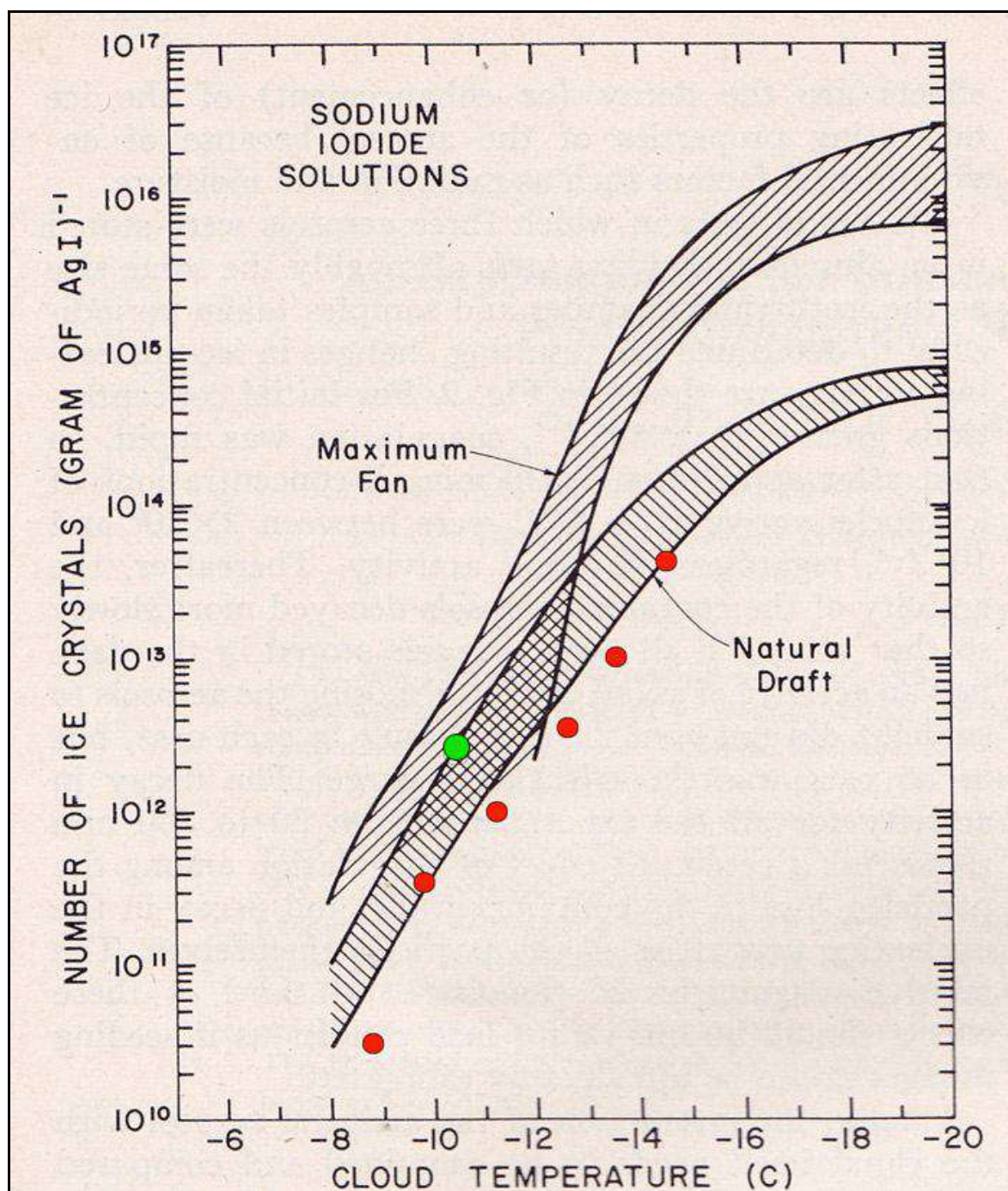


Рис.6 Сравнение результатов испытания наземного генератора красный маркер (скорость обдува 2 м/сек) с данными работы 1 (фоновый рисунок).

Как видно из сравнения данных, полученные результаты достаточно близко совпадают с результатами работы Гарвея, однако следует учесть, что в его работе исследовались на порядок большие концентрации йодистого серебра и йодирующей добавки (табл.1).

Таблица 1 Содержание йодистого серебра в рабочем растворе и использованный генератор в работе 1

Генератор	Массовый расход раствора	Содержание AgJ*
North American (Weather Consultant)	4 %	0.36 г мин <sup>-1</sup>
EG & G	4 %	0.36 г мин <sup>-1</sup>
New Mexico State	1.7 %	0.8 г мин <sup>-1</sup>

- В качестве второго компонента использовался йодистый натрий в количестве, достаточном для перевода AgJ в фазу раствора

То же самое следует и из работы II. Хотя предметом исследования в работе является самолетный ацетоновый генератор (и соответственно имеют место гораздо более высокие скорости обдувающего генератор потока, до 100 м/сек), составы рабочих растворов, исследованные в работе также значительно превышают величины, указанные в «Техническом задании» (1.8 г. AgJ и 0.72 г KJ на литр раствора, процентная концентрация при плотности раствора 0.8 г/см<sup>3</sup> составит **0.225** и **0.09** % соответственно).

Так в работе 2 рекомендуемый диапазон концентраций рабочего раствора для самолетного ацетонового генератора составляет:

- по AgJ от 1 до 10 %
- по NH<sub>4</sub>J от 2 до 16 %

В работе 2 (и с некоторыми вариациями, в работе 1) йодистый аммоний рекомендован как максимально эффективная йодирующая добавка.

В целях сравнения характеристик исследуемого генератора с работой I нами было произведено измерение льдообразующей активности раствора

следующего состава, что достаточно близко к одной из исследованных рецептур работы I):

- ацетон 1 литр
- йодистое серебро 18 г ( 2.25 %)
- йодистый натрий 8 г ( 1% )

При скорости обдува 5 м/сек получены следующие результаты (табл 2), что полностью попадает в диапазон исследованных результатов работы I (зеленая тоочка на рис 6). Соответствующие цифровые фотографии ледяных кристаллов приведены на рис 7 и 8.

Табл. 2 результаты исследования рабочего раствора 18 г/л AgJ

<i>Скорость обдува</i>	<i>Расход состава</i>	<i>Время отбора</i>	<i>Температ, град.</i>	<i>Выход ядер</i>	
5	1	20-25с	-10.2	<b>6.81E+10</b>	<b>3.03E+12</b>

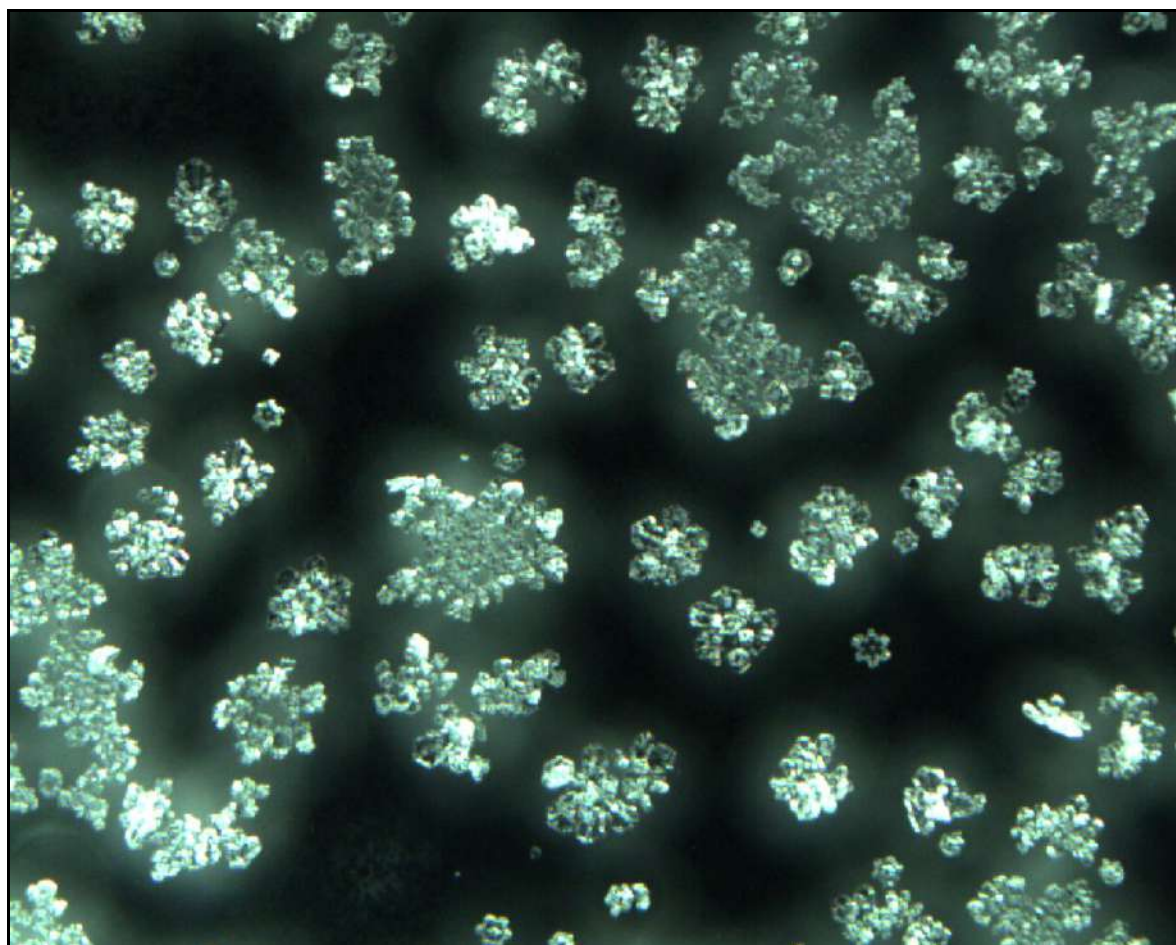




Рис. 7 Фотография ледяных кристаллов на подложке. Рабочий раствор 1.8 г/л AgI дозированный объем аэрозоля из тракта ГАТ 2000 мл, температура минус 11.4°C, скорость обдува генератора 5 м/сек

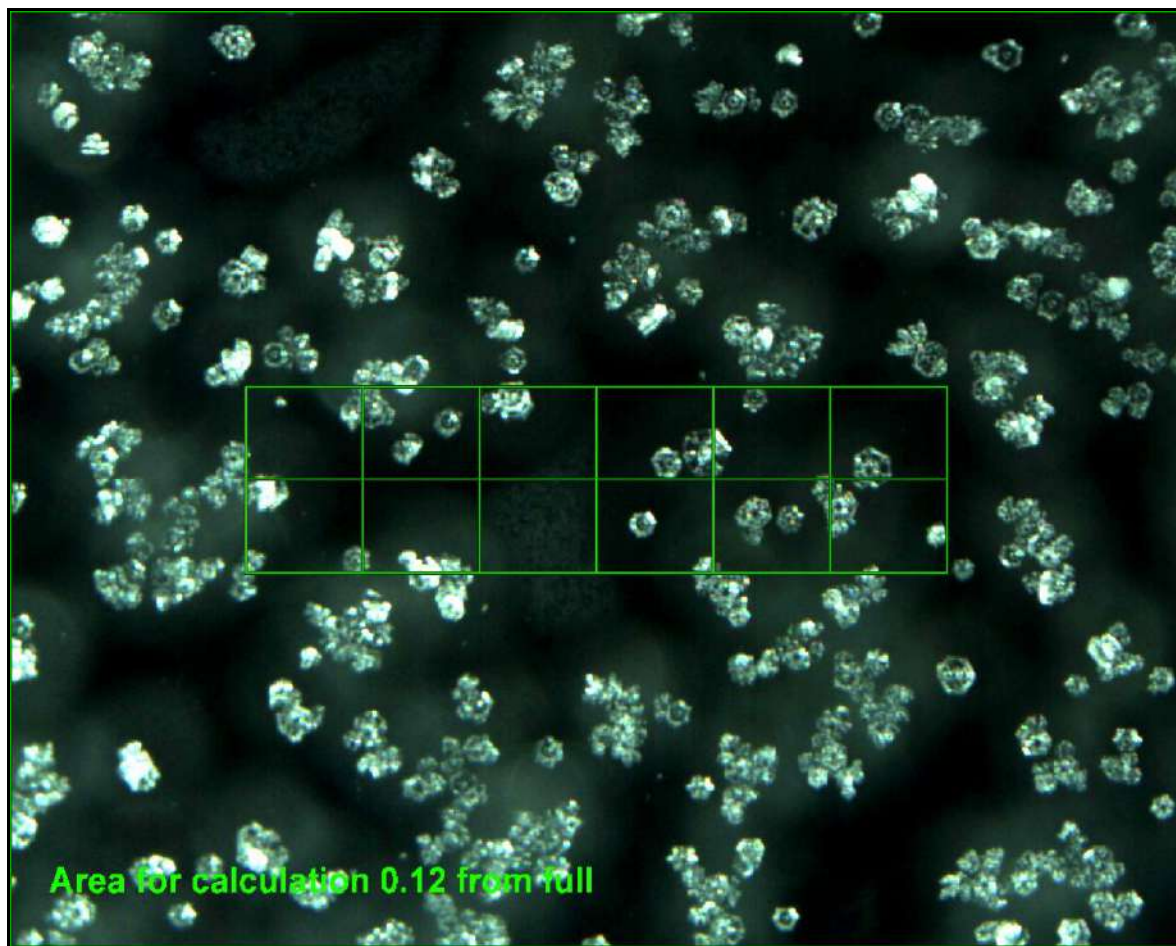


Рис. 8 Фотография ледяных кристаллов на подложке. Рабочий раствор 18 г/л AgI дозированный объем аэрозоля из тракта ГАТ 500 мл, температура минус 10.2°C, скорость обдува генератора 5 м/сек

## **ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

С точки зрения сотрудников ФГБУ «НПО «ТАЙФУН» определенные в «Техническом Задании» концентрации рабочего раствора слишком малы и не позволяют достичь максимально возможного эффекта использования йодистого серебра, который для этого генератора может быть увеличен ориентировочно на половину порядка величины (при повышении концентрации раствора по AgI с одновременной заменой йодистого калия на йодистый аммоний). Это же

показывают и произведенные тесты с раствором 18 г/л AgI и йодирующей добавкой – йодистым натрием. Тем не менее, увеличение содержания йодистого серебра напрямую, без предварительных тестов и консультаций, рекомендовано быть не может, поскольку непонятны причины, побудившие изготовителя генератора рекомендовать растворы столь малой концентрации. В качестве таковых возможно предположить возрастающую коррозионную активность раствора, увеличивающуюся вероятность засорения узких рабочих каналов форсунки более концентрированными растворами при их высыхании, экономические причины и пр. Также непонятен выбор в качестве йодирующей добавки йодистого калия, отличающегося в ряду NaI, KI, NH<sub>4</sub>I наименьшей растворимостью, а соответственно при увеличении его концентрации на порядок существенно возрастает риск засорения форсунки. В цитируемых работах предпочтение отдается или йодистому натрию или, что еще более предпочтительнее – йодистому аммонiu.

При наличии интереса кубинской стороны, в качестве отдельной работы может быть выполнено тестирование более эффективного рабочего раствора, состав которого следует обсудить предварительно.

**От НПО «Тайфун»**

**Зав.лаб., к.ф.-м.н Савченко А.В.**

**Ст.научн.сотр. к.ф.-м.н Шилин А.Г.**

## **ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Dennis M. Garwey “Testing of Cloud-Seeding Materials at the Cloud Simulation and Aerosol Laboratory” Journal of Applied Meteorology, 08.1975 p.883-890
2. Баханова Р.А., Киселев В.И., Куку Е.И., Ким Н.С., Шкодкин А.В.  
«Характеристики льдообразующего аэрозоля, создаваемого самолетным

генератором в скоростном воздушном потоке» Физика Облаков и Активные Воздействия, 1991 г. стр 102-110.

## **Informe resumido de ejecución de las mediciones de salida de núcleos glaciogénicos de los generadores terrestres de yoduro de plata producidos por la empresa chilena Hidromet S.A.**

En diciembre del 2012, el Complejo Científico Técnico Typhoon envió en el INSMET la versión electrónica en ruso del informe “Determinación de la efectividad glaciogénica del modelo de generador terrestre utilizado en el proyecto “Diseño e implementación de un Programa de Estimulación de la Lluvia, Fase I”, para su evaluación técnica. Este informe se analizó en detalle por los especialistas del INSMET vinculados al Proyecto, que manifestamos nuestra su conformidad con la corrección científica de los métodos aplicados, los cuales se ajustan a la metodología acordada previamente, y por tanto, suscribimos la confiabilidad de los resultados, y recomendamos considerar como cumplida esta tarea.

A continuación se incluyen los aspectos esenciales del informe.

Las pruebas se realizaron en el período desde el 1-10-2012 al 01-12-2012, el laboratorio de simulación de nubes y nieblas del Instituto de Meteorología Experimental de Obninsk, Rusia, perteneciente al Complejo Typhoon, del Servicio Meteorológico Ruso (Roshydromet).

Inicialmente se evaluó la posibilidad de efectuar la prueba con un generador chileno original, lo cual se descartó por los costos adicionales vinculados al traslado de Cuba a Rusia de esta estructura sumamente voluminosa y pesada. Se adoptó la decisión de desarrollar un modelo funcional equivalente, utilizando la boquilla de dispersión original y la descripción del sistema que consta en los documentos adjuntos al contrato.

Las pruebas se realizaron en el tubo aerodinámico horizontal del laboratorio, según la metodología del Instituto de Meteorología Experimental. La velocidad del flujo se estableció en correspondencia con el programa de observaciones y su dirección fue perpendicular al eje de la cámara de combustión del generador. El valor del flujo de salida de reactivo durante las pruebas fue de  $1 \pm 0,1$  g/s

Los resultados se muestran en la Tabla 1, y en las figuras 1 y 2. De las figuras se evidencia la esperada dependencia exponencial creciente de la salida de núcleos con el valor absoluto de la temperatura negativa y una ligera tendencia a la disminución de la salida con la velocidad del flujo.

Tabla 1. Parámetros experimentales de las pruebas y salida de núcleos glaciogénicos por gramo de disolución y por gramo de yoduro de plata en cada una de ellas, expresado en cristales de hielo formados por gramo de solución y por gramo de yoduro de plata.

<i>Velocidad de ventilación</i>	<i>Gasto de solución</i>	<i>Tiempo de muestreo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Salida de núcleos</i>	
<i>m/s</i>	<i>g/s</i>	<i>s</i>	<i>°C</i>	<i>Por gramo de solución</i>	<i>Por gramo de AgI</i>
10	1	20-25s	-15.0	<b>4.25E+10</b>	<b>1.98E+13</b>
10	1	20-25s	-13.4	<b>6.50E+09</b>	<b>2.89E+12</b>
10	1	20-25s	-12.5	<b>5.65E+09</b>	<b>2.51E+12</b>
10	1	20-25s	-11.4	<b>5.90E+09</b>	<b>2.62E+12</b>
10	1	20-25s	-10.6	<b>1.04E+09</b>	<b>4.62E+11</b>
10	1	20-25s	-9.4	<b>3.81E+08</b>	<b>1.69E+11</b>
5	1	20-25s	-14.5	<b>2.04E+10</b>	<b>9.07E+12</b>
5	1	20-25s	-13.4	<b>1.05E+10</b>	<b>4.67E+12</b>
5	1	20-25s	-12.5	<b>4.12E+09</b>	<b>1.83E+12</b>
5	1	20-25s	-11.4	<b>4.90E+09</b>	<b>2.18E+12</b>
5	1	20-25s	-10.0	<b>6.41E+08</b>	<b>2.85E+11</b>
5	1	20-25s	-9.2	<b>2.25E+08</b>	<b>1.00E+11</b>
2	1	20-25s	-14.5	<b>1.10E+11</b>	<b>4.89E+13</b>
2	1	20-25s	-13.5	<b>2.50E+10</b>	<b>1.11E+13</b>
2	1	20-25s	-13.5	<b>6.40E+09</b>	<b>2.84E+12</b>
2	1	20-25s	-11.2	<b>2.30E+09</b>	<b>1.02E+12</b>
2	1	20-25s	-9.8	<b>5.82E+08</b>	<b>2.59E+11</b>
2	1	20-25s	-8.8	<b>6.40E+07</b>	<b>2.84E+10</b>



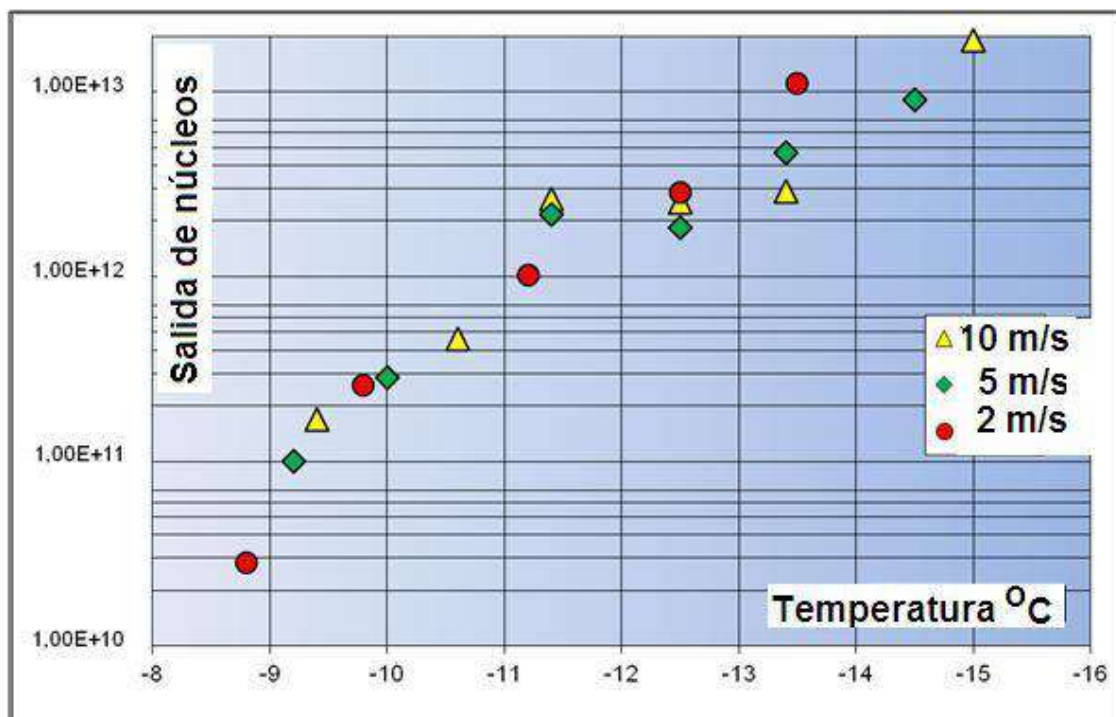


Figura 1. Dependencia con la temperatura de la salida de núcleos glucogénicos por gramo de disolución de trabajo para diferentes velocidades del flujo de aire.

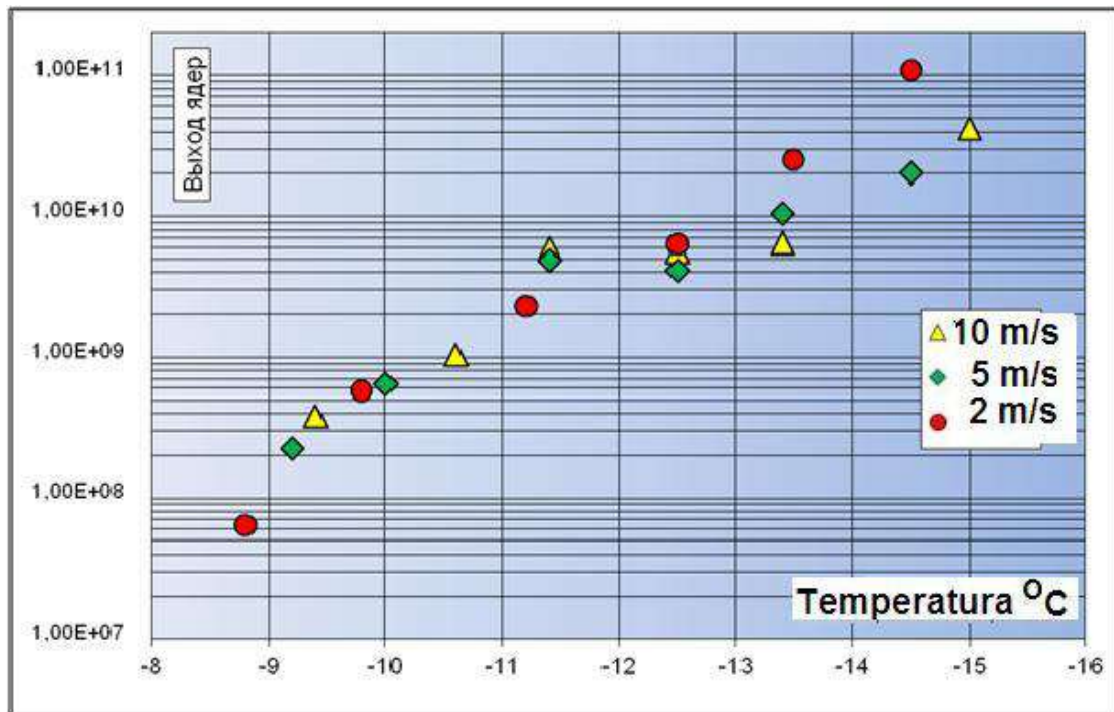


Figura 2. Dependencia con la temperatura de la salida de núcleos glucogénicos por gramo de yoduro de plata para diferentes velocidades del flujo de aire.

Como este tipo de generador no se había probado anteriormente en el laboratorio del Complejo Typhoon, se compararon los resultados con dos trabajos relacionados con un generador similar, de fabricación norteamericana y rusa. En la Figura 3, tomada del primero de ellos, se superponen los resultados de las mediciones realizadas en el presente trabajo.

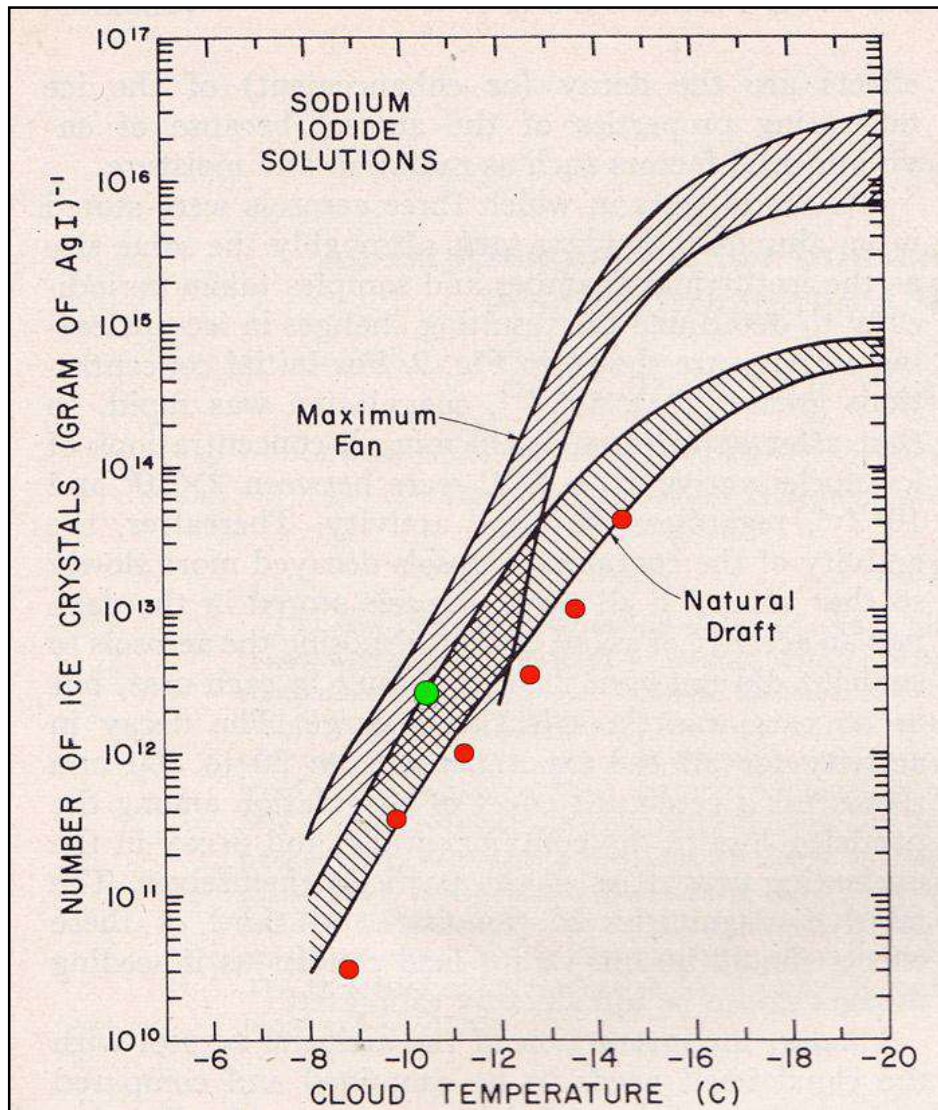


Figura 3. Número de cristales de hielo que se forman a la salida del generador por gramo de  $\text{AgI}$ , en dependencia de la temperatura. Tomado del artículo de Garwey(1975) sobre el cual se representan los resultados de las pruebas del presente trabajo por puntos rojos y la medición de Bajanova (1991) por el punto verde.

Como se ve de la comparación de los datos, los resultados son bastante cercanos a los de Garway, pero hay que señalar que en dicho trabajo se utilizaron concentraciones mayores de yoduro de plata y la sal de yodo complementaria.

De la comparación con los resultados de Bajanova et al. se llega a una conclusión similar, aunque en este caso el generador de acetona utilizado estaba diseñado para instalarse en una aeronave y por lo tanto hay tasas mucho más altas de viento, del orden de hasta 100 m / seg. En este caso, las concentraciones utilizadas también exceden las utilizadas en los generadores objeto de las presentes pruebas, definidas en la “Tarea Técnica” (1,8 g de AgI y 0,72 g de KI por litro de solución, equivalente a una concentración porcentual de 0,225 y 0,09% respectivamente, para una densidad de la solución 0,8 g/cm<sup>3</sup>).