

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ СТАНЦИЙ В КАЧЕСТВЕ ИНСТРУМЕНТА БОРЬБЫ С ГРАДОВЫМ ЯВЛЕНИЕМ

Хачатрян А.Ж.¹, Суренян Г.Г.², Хоецян А.В.³, Агабекян В.Н.⁴, Акопян А.С.⁵,
Мосоян Д.О.⁶ Email: Khachatrian657@scientifictext.ru

¹Хачатрян Ашот Жюльвернович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой,
кафедра физики,

Национальный политехнический университет Армении;

²Суренян Гагик Гамлетович – кандидат географических наук, начальник,
метеорологический центр Гидрометцентра Армении,

Гидрометцентр Министерства чрезвычайных ситуаций Армении;

³Хоецян Ашот Владимирович - доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой,
кафедра географии,

Армянский государственный педагогический университет;

⁴Агабекян Виген Нверович – заведующий лабораторией,
лаборатория модуляционных явлений;

⁵Акопян Александр Сергеевич – старший инженер,
лаборатория упорядоченных и не упорядоченных пористых сред,
Институт прикладных проблем физики Национальной Академии наук Армении;

⁶Мосоян Давид Оганесович – магистрант,
кафедра радиотехнических устройств, факультет радиотехники,

Национальный политехнический университет Армении,

г. Ереван, Республика Армения

Аннотация: проведен анализ принципов работы газогенераторных станций. На основе законов газовой динамики и уравнений Мецгерского, для систем с изменяющейся во времени массой, получены выражения для плотности, скорости и внутренней энергии объема шарового сегмента воздуха, перемещаемого в результате воздействия на него ударной звуковой волны, образовавшейся при выходе из сопла станции струи газа, от высоты. Определены спектральные энергетические зависимости и интенсивности давления ударной звуковой волны от высоты. Показано, что полученные значения поверхностной плотности энергии звуковых волн 0.06 Дж/м^2 , 0.025 Дж/м^2 , 0.014 Дж/м^2 на высотах 1000м, 1500м и 2000м чрезвычайно малы, для того, чтобы предотвратить процессы градообразования. Воздействие данных волн на грозовые облака может быть ощутимым лишь на высотах порядка 500 м и в условиях гористой местности.

Ключевые слова: газогенераторная станция, ударная звуковая волна, град, сопло Лавалья, шаровой сегмент воздуха.

RESEARCH OF EFFICIENCY OF A GAS GENERATOR STATIONS AS A TOOL TO FIGHT AGAINST A HAIL PHENOMENA

Khachatrian A.Zh.¹, Surenyan G. H.², Khoetsyan A.V.³, Agabekyan V.N.⁴,
Akopyan A.S.⁵, Mosoyan D.O.⁶

¹Khachatrian Ashot Zhulvernovich – Doctor of science, Professor, Head of physics Department,
PHYSICS DEPARTMENT,

NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY OF ARMENIA;

²Surenyan Gagik Hamletovich – PhD in Geography, Head,
METEOROLOGICAL CENTER OF THE HYDROMET SERVICE MINISTRIES OF EMERGENCY SITUATIONS OF
REPUBLIC OF ARMENIA;

³Khoetsyan Ashot Vladimirovich - Doctor of science, Professor, Head of Department,
GEOGRAPHY DEPARTMENT,

ARMENIAN STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY;

⁴Agabekyan Vigen Nverovich – Head of Laboratory,
LABORATORY MODULATION EFFECTS;

⁵Akopyan Aleksandr Sergeyevich – Senior Engineer,
LABORATORY ORDERED AND UNORDERED POROUS MEDIA,
INSTITUTE OF APPLIED PROBLEMS OF PHYSICS NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE ARMENIA;

⁶Mosoyan David Ovanesovich – Master Student,
DEPARTMENT OF RADIOTECHNICAL DEVICE, FACULTY OF RADIO ENGINEERING,
NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY OF ARMENIA,
YEREVAN, REPUBLIC OF ARMENIA

Abstract: an analysis of the principles of operation of gas generating stations was carried out. On the basis of the laws of gas dynamics and the Meshchersky equation, for systems with a time-varying mass, expressions were obtained for the density, velocity and internal energy of a spherical air segment displaced by the impact of a shock sound wave on it at the exit from the nozzle of the gas jet station, on the height. The spectral energy dependences and intensity of the pressure of the shock wave on the height are determined. It is shown that the obtained values of the surface energy density of sound wave 0.06 J/m^2 , 0.025 J/m^2 , 0.014 J/m^2 on the heights of 1000m, 1500m and 2000m are extremely small, in order to prevent processes of hail formation. The impact of these wave-storm clouds can be noticeable only at heights of about 500 m and in mountainous conditions.

Keywords: gas generator station, shock sound wave, hail, Laval nozzle, spherical segment of air.

УДК 551.576: 551.509

1. Введение

Неблагоприятные явления погоды (град, засуха, наводнения, паводки и пр.) во многих странах и регионах приводят к чрезвычайным ситуациям, человеческим жертвам и наносят большой ущерб сельскому хозяйству, флоре, фауне, строениям, линиям электроснабжения и пр. В проблеме целенаправленного преобразования атмосферных явлений важное место занимает активное воздействие на облака с целью регулирования их естественного хода развития [1, 2]. Основной задачей, имеющей большое народнохозяйственное и военно-прикладное значение, является предотвращение градобитий и рассеяние грозовых облаков. Проблема борьбы с градовыми явлениями имеет серьезное экономическое значение для многих регионов мира. В зависимости от регионов и местных условий применяются различные методы борьбы с градом: авиационный, артиллерийский, ракетный и наземно-генераторный [3-5].

В последнее десятилетие в различных странах мира для борьбы с градовым явлением получили большое применение газогенераторные станции (ГГС) [6, 7]. Однако конкретная оценка эффективности их применения, т.е. оценка степени воздействия образованной ими звуковой волны на градовые облака, еще не осуществлена. В связи с этим, количественная оценка силового воздействия звуковой волны на облака является актуальной задачей для оценки воздействия ГГС на кучево-дождевые облака, приводящие к градовым явлениям

2. Принцип работы ГГС и определение параметров ударной звуковой волны

Основными рабочими узлами станции ГГС является камера сгорания и сопло, через которое выходит в атмосферу образованная при сгорании в камере газовая смесь. В ГГС ударная звуковая волна получается в результате выхода в атмосферу со сверхзвуковой скоростью сгоревших в камере газов, в качестве которых обычно используется: ацетилен, пропан, бутан или же смесь последних двух, так называемые, пропан-бутановые газовые смеси. Горение данных газов в воздухе происходит молниеносно в виде взрыва, значения величин теплот выделяемых при этом приводятся в Табл. 1.

В применяемых в настоящее время ГГС размер камеры сгорания, в которую подается газ с массой около 40 г., порядка 0.25 м^3 . Для обеспечения полного сгорания газа одновременно с ним в камеру закачивается воздух.

Таблица 1. Теплота сгорания газов, применяемых в ГГС

ацетилен	$50.4 \times 10^6 \text{ Дж/кг}$
пропан	$48 \times 10^6 \text{ Дж/кг}$
бутан	$45.8 \times 10^6 \text{ Дж/кг}$
пропан-бутановая газовая смесь	$47 \times 10^6 \text{ Дж/кг}$

В процессе накачки камеры смесью газа с воздухом давление в ней доводится до 2.2 атм., после сгорания в камере образуется смесь газов CO_2 , N_2 , H_2O и давление повышается до 13 атм. и устанавливается температура 3000К. Образовавшаяся при сгорании газовая смесь (газ) из камеры перемещается в выходное сопло ГГС, придающее ее распространению вертикальную направленность. Газ, вырывающийся из сопла, распространяется в атмосфере со сверхзвуковой скоростью, в виде ударной звуковой волны, играющей роль газового поршня, сжимающего встречный воздух.

Для определения характеристик полученной ударной звуковой волны предположим, что выходящий из сопла газ распространяется преимущественно в вертикальном направлении, ограниченном шаровым сегментом, соответствующему телесному углу раствора сопла ГГС. Выходящий из сопла со сверхзвуковой скоростью газ выполняет три основные вида работ: первый осуществляется при поднятии вверх воздуха, ограниченного объемом сегмента, для преодоления силы притяжения; второй - сил упругости, возникающими при сжатии перемещаемого объема воздуха, третий - для перехода внутренней энергии выходящего газа в кинетическую энергию поднимающегося воздуха.

Объем шарового сегмента с радиусом h , с раствором телесного угла сопла ГГС $\Delta\Omega$, определяется как

$$V = \Delta\Omega h^3 / 3. \quad (1)$$

При расчетах значение телесного угла сопла $\Delta\Omega$ можно принять равным $1/36$ рад., соответствующему значению телесного угла сопла наиболее распространенных ГГС “ЗЕНИТ”. На основании барометрической формулы Больцмана можно определить массу воздуха, содержащегося в шаровом сегменте в зависимости от его радиуса, принимая, что точка основания шарового сегмента расположена на уровне моря, а температура воздуха равна 293 К. Как видно из рассчитанного для массы воздуха функциональной зависимости (Рис.1), на высоте 90 м масса воздуха, заполняющего данный сегмент, равна 6.75 тонн.

Значение величины работы, осуществляемой для преодоления силы притяжения при поднятии воздуха, содержащегося в данном сегменте, на высоту h , равно

$$E(h) = g\Delta\Omega \int_0^h (h-r)\rho(r)r^2 dr \quad (2).$$

Результаты расчета по данной формуле в виде зависимости от высоты представлены на Рис. 2.

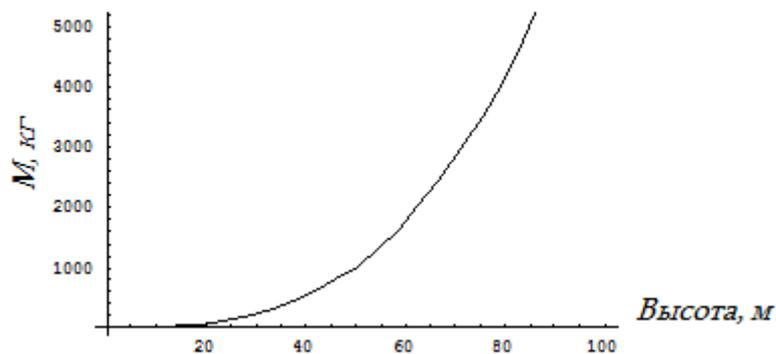


Рис. 1. Зависимость массы содержащегося в шаровом сегменте воздуха от высоты

На основании Табл. 1 можно определить, что выделяемая при сжигании 40 г газа энергия равна примерно 2×10^6 Дж. Это значение энергии, согласно Рис.2, вполне достаточно для поднятия воздуха объёма шарового сегмента радиуса 100м на высоту 100м. Однако, необходимо учесть, что расширение газа содержащегося в данном сегменте до таких высот невозможно, т.к. помимо работы против сил тяготения, газ должен выполнять также работу, направленную на сжатие воздуха.

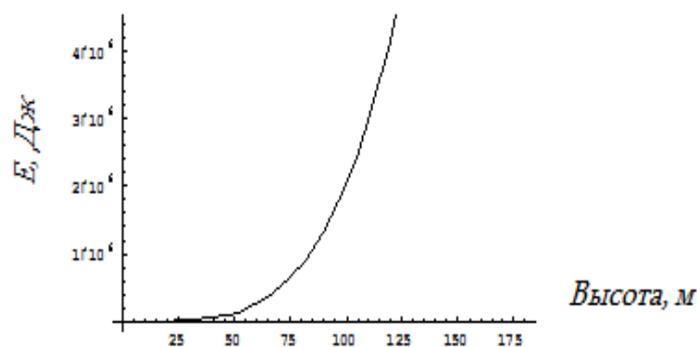


Рис. 2. Значение величин работы для преодоления силы притяжения при перемещении воздуха шарового сегмента от высоты

Для разгона ударной звуковой волны до сверхзвуковой скорости в ГГС используется, так называемое, сопло Лавала [8] (Рис. 3), состоящее из сужающейся и расширяющейся частей. В сужающейся части скорость потока увеличивается от начального значения до скорости звука в горловине, в расширяющейся же части наблюдается дальнейшее увеличение скорости потока. Для уменьшения потерь энергии расширяющаяся часть соединяется с сужающейся плавным переходом – горловиной.

На рис. 3 параметры f_1, f_2, f_3 соответствуют значениям поверхностных сечений сопла, V - скорость газа в соответствующих областях сопла, a - скорость звука.

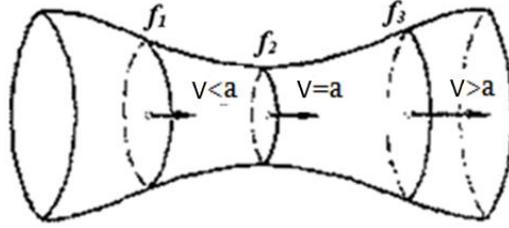


Рис. 3. Форма сопла Лавая

Если энергию выделяемую при сгорании газа в камере принять равной 2×10^6 Дж, то, часть ее преобразуемая в кинетическую энергию, равна 1.4×10^6 Дж. (с учетом, что КПД сопла Лавая порядка 70%). На основании выражения $E_{кин} = mV^2/2$, учитывая, что $m=0.65$ кг (масса газа внутри камеры), легко определить скорость выхода ударной волны из сопла, как $V = 2000$ м/с.

Во всех точках, расположенных на выходной поверхности сопла f_3 , эта величина имеет постоянное значение, однако направление потоков выходных газов меняется в зависимости от их месторасположения: в областях близких к оси сопла поток будет иметь преимущественно вертикальную направленность, по краям же сопла, помимо вертикальной составляющей, поток будет иметь также и горизонтальную. Импульс потока газа, выходящего из произвольной малой элементарной выходной поверхности сопла, может быть представлен в виде.

$$d\vec{P} = d\vec{P}_v + d\vec{P}_h, \quad (3)$$

где $d\vec{P}_v$ его вертикальная, а $d\vec{P}_h$ горизонтальная составляющая.

Полную вертикальную составляющую импульса, исходящего из сопла потока газа, можно получить, как

$$P_v = \int d\vec{P}_v = 2\pi \cdot mV \int_0^{\theta_{max}} \cos \theta d\theta, \quad (4)$$

где θ_{max} угол раствора сопла.

Исходя из (4), можно получить полное значение импульса $P_v \approx 1200$ кг м/с. Рассчитаем также горизонтальную составляющую скорости выходящего потока газа. Т.к. в различных областях выходной поверхности сопла она принимает различное значение (в центре равна нулю, а по краям принимает максимальное значение), то ее значение можно определить усреднением суммы значений скоростей по краям и в центре, на основании чего получим для горизонтальной составляющей скорости значение $V_h \approx V \sin \theta_{max}/2 \approx 300$ м/с.

Термодинамические параметры, быстро расширяющегося газа, связаны уравнением адиабаты Гюгонио [9]. Пренебрегая потерями, можно считать, что энергия, полученная при сжигании газа в камере, расходуется на поднятие массы воздуха ограниченного сегментом на высоту h , его сжатием, а также сообщению ему определенной скорости V .

Исходя из закона сохранения энергии, можно записать:

$$\frac{m(h)V^2}{2} + m(h)gh + P_0 h^3 \Delta\Omega = E, \quad (5)$$

где $m(h)$ - значение массы воздуха от высоты.

Принимая $V = 2000$ м/с, $E = 1.4 \cdot 10^6$ Дж. и рассчитав значение $m(h)$ по формуле $m(h) = \rho \Delta\Omega h^3 / 3$, из (5) можно получить значения составляющих слагаемых уравнения (5): первое, представляющее кинетическую энергию сжатого воздуха, равно $0.238 \cdot 10^6$ Дж. (17 % энергии сгорания), второе- энергию, расходуемую на поднятие массы воздуха, равно $0.14 \cdot 10^5$ Дж. (1 % энергии сгорания), третье - $1.148 \cdot 10^6$ Дж. (82% энергии сгорания).

Как известно, динамика систем с изменяющейся массой описывается на основе уравнения Мещерского, которое в нашем случае имеет следующий вид [9].

$$\frac{d}{dt} [m(t)u(t)] = -m(t)g - P_0 h^2(t) \Delta\Omega, \quad (6)$$

где $m(t) = \rho \frac{\Delta\Omega}{3} h^3(t)$,

Дополняя уравнение (6) законом сохранения массы;

$$\frac{dm(t)}{dt} = \frac{\rho \Delta\Omega}{3} \left[\int_0^t u(\tau) d\tau \right]^3, \quad (7)$$

получим полную систему дифференциальных уравнений для определения значений массы $m(t)$ и скорости $u(t)$. Численное решение уравнений (6) и (7) для промежутка времени τ , в течение которого скорость ударной волны падает до звуковой, дает значение: $\tau = 6 \cdot 10^{-3}$ с., с массой воздуха в момент τ $m(t) = 3.75$ кг. Толщина сжатого воздуха при этом получается равной 8см, с давлением в нем 130 атм и скорости распространения ударной волны 350 м/с.

Основываясь на законах газовой динамики [8,9] и пренебрегая действием силы тяжести на объём поднимаемого воздуха, для определения плотности, $\rho(h,t)$, скорости $u(h,t)$ и внутренней энергии $e(h,t)$ элемента воздуха на высоте h в момент времени t , можно записать следующую систему дифференциальных уравнений:

$$h^2 \frac{\partial \rho(h,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial h} [\rho(h,t)u(h,t)h^2] = 0, \quad (8)$$

$$h^2 \frac{\partial u(h,t)\rho(h,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial h} [h^2 (p(h,t) + \rho(h,t)u^2(h,t))] = 0, \quad (9)$$

$$h^2 \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho(h,t)e(h,t) + \frac{\rho(h,t)u^2(h,t)}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial h} \left[h^2 \left(\rho(h,t)(e(h,t) + \frac{u^2(h,t)}{2}) + p(h,t)u(h,t) \right) \right] = 0. \quad (10)$$

Предполагая, что процесс сжатия и растяжения воздуха носит адиабатический характер, можно показать, что распространение волны описывается следующим волновым уравнением:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - c^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial h^2} + \frac{2}{h} \frac{\partial P}{\partial h} \right) = 0, \quad (11)$$

где $c = 350$ м/с, а величина $P = p - p_{atm}$ - избыточное давление (p_{atm} - атмосферное давление на уровне моря). Общее решение уравнений (8) - (10) имеет вид

$$P = \frac{A_1}{h} f_1(h - ct) + \frac{A_2}{h} f_2(h + ct), \quad (12)$$

где f_1, f_2 произвольные функции, а A_1, A_2 произвольные постоянные.

Легко убедиться, что замена в (11) P на $P \cdot h$, преобразует его в известное уравнение Даламбера;

$$\frac{\partial^2 \Psi(h,t)}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \Psi(h,t)}{\partial h^2} = 0, \quad (13)$$

где

$$\Psi(h,t) = P(h,t) \cdot h. \quad (14)$$

Ограничиваясь только рассмотрением расходящихся волн, это уравнение может быть заменено уравнением первого порядка;

$$\frac{\partial \Psi(h,t)}{\partial t} - c \frac{\partial \Psi(h,t)}{\partial h} = 0, \quad (15)$$

которое может быть решено с учетом начального условия;

$$\Psi(h,0) = \Psi_0(h).$$

Согласно граничным условиям рассматриваемой задачи

$$\Psi_0(h) = p_{atm} h \quad \text{при } h < 7.5 \text{ м и } h > 7.5 \text{ м} + 8 \text{ см}$$

$$\Psi_0(h) = 130 \cdot p_{atm} h \quad \text{при } 7.5 \text{ м} \leq h \leq 7.5 \text{ м} + 8 \text{ см}.$$

легко увидеть, что решение (15) имеет вид функции начального условия, в котором переменная h заменена на $(h-ct)$ т.е.

$$\Psi(h,t) = \Psi_0(h - ct). \quad (16)$$

Согласно данному результату, по мере распространения волны, давление в воздухе убывает по гиперболическому закону, при неизменной толщине сжатого воздуха. Следовательно, продолжительность звуковой волны на всех высотах будет одной и той же $\Delta t = 8 \text{ см} / 350 \text{ м/с} = 10^{-4}$ с.

Давление P на высоте h можно представить следующим образом

$$P = \frac{\bar{P}}{h}, \quad (17)$$

где $\bar{P} = 130 \cdot p_{\text{atm}}$, $\bar{h} = 7.5$ м.

Т.е. на высоте 1000 м давление в звуковой волне становится равным атмосферному.

Используя вид начального условия, а также (17), Фурье интеграл давления звуковой волны, можем записать в виде:

$$P(h, t) = \frac{2\bar{P} \cdot \bar{h}}{\pi h} \int_0^{\infty} \frac{\sin[\omega\Delta t / 2]}{\omega} \cos[\omega(t - h/c)] d\omega, \quad (18)$$

где подынтегральная функция $\sin[\omega\Delta t / 2] / \omega$ определяет спектр звуковой волны;

$$P_{\omega} = \frac{2\bar{P}\bar{h}}{\pi h} \cdot \frac{\sin[\omega\Delta t / 2]}{\omega}. \quad (19)$$

Заметим, что (19) имеет смысл распределения плотности давления по частотам, т.е. величина $P_{\omega} d\omega$ равна давлению создаваемому волнами в частотном диапазоне от ω до $\omega + d\omega$.

На рис. 4 приводится рассчитанная согласно (19) графическая зависимость P_{ω} от частоты для различных значений высот h (1000 м, 1500 м, 2000 м).

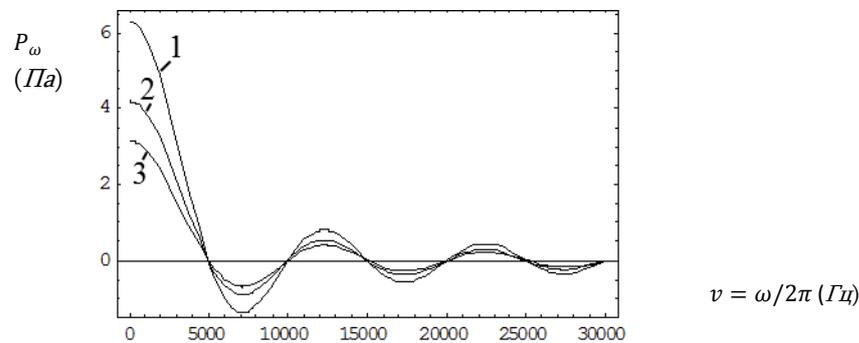


Рис. 4. Спектральная зависимость давления ударной волны (1- $h = 1000$ м, 2- $h = 1500$ м, 3- $h = 2000$ м)

Согласно рис. 4, для всех значений высот, давление по абсолютной величине в зависимости от частоты падает: в различных областях спектра давление может принимать как положительное, так и отрицательное значения, т.е. волны в определенном частотном диапазоне сжимают, а в другом разжимают воздух. Из рисунка также видно, что давление в ультразвуковой области быстро затухает, стремясь к нулю.

Для гармонической волны интенсивность звуковой волны (вектор Умова) связана с давлением, как

$$I_{\omega}(h) = \frac{P_{\omega}^2}{\rho \cdot c}. \quad (20)$$

На основании (19) и (20) были рассчитаны зависимости спектральной интенсивности от частоты (Рис.5).

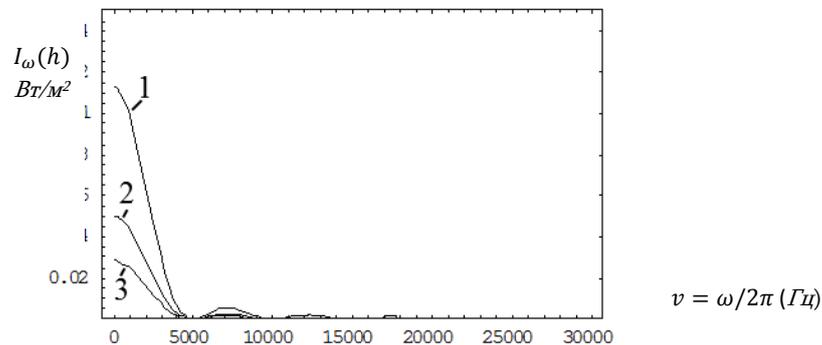


Рис. 5. Значение величин вектора Умова для ударной волны воздуха (1- $h = 1000$ м, 2- $h = 1500$ м, 3- $h = 2000$ м)

Как видно из рис. 5, для всех рассматриваемых значений высот, основная часть интенсивности звуковой волны распределена в диапазоне ниже 5000 Гц.

Для оценки интенсивности звука воспользуемся формулой

$$L = 10 \cdot \lg(I / I_0) \text{ (дБ)}, \quad (21)$$

где $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² интенсивность порога слышимости для частоты 1000 Гц

Для рассматриваемых значений высот (1000 м, 1500 м, 2000 м) спектральные зависимости величины L приведены на рис. 6, как видно на всем спектральном интервале высота звука в среднем меньше 100 дБ.

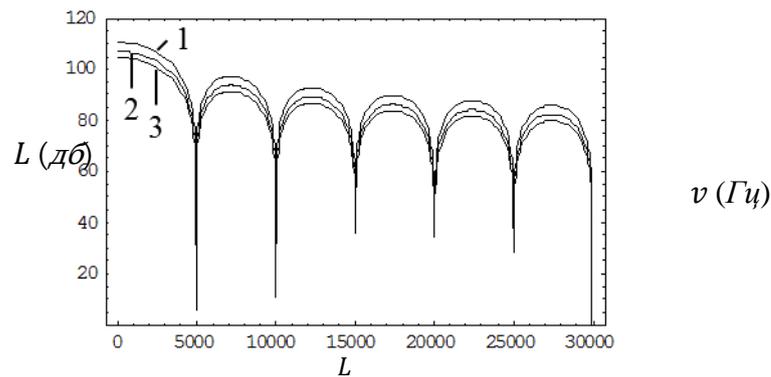


Рис. 6. Спектральная зависимость интенсивности ударной звуковой волны

Общую (интегральную) интенсивность звука можно определить, как

$$I(h) = \int_0^{\omega} I_{\omega}(h) d\omega. \quad (22)$$

Исходя из (19) и (20) можно получить значение $I(h)$ равное $2.8 \cdot 10^8$ Вт/м².

Согласно данной формуле, получим значения интенсивностей звука на разных высотах: $I(1000) = 278$ Вт/м², $I(1500) = 123$ Вт/м², $I(2000) = 69$ Вт/м².

Учитывая, что продолжительность звуковой волны равна 2×10^{-4} с, легко найти количество энергии, которое переносит звуковая волна на квадратный метр, как $\Delta E(h) = I(h) \Delta t$: $\Delta E(1000) = 0.06$ Дж/м², $\Delta E(1500) = 0.025$ Дж/м², $\Delta E(2000) = 0.014$ Дж/м².

3. Заключение

Звуковые волны, возбужденные газогенераторными станциями, не могут существенно влиять на физические процессы, происходящие в грозовых облаках, поскольку полученные значения поверхностной плотности энергии данных звуковые волн 0.06 Дж/м², 0.025 Дж/м², 0.014 Дж/м² на высотах 1000м, 1500м и 2000м чрезвычайно малы, для того, чтобы возбудить какие - либо существенные физические процессы в грозовых облаках. Воздействие данных волн может быть ощутимым только лишь на высотах порядка 500 м и в условиях гористой местности.

Список литературы / References

1. Боровиков А.М., Гайворонский И.И. и др. Физика облаков. Ленинград. Гидрометеоздат, 1961. 456 с.
2. Денис А. Изменение погоды человеком. М. Мир. 1983, 272 с.
3. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. Л., Гидрометеоздат, 1967. 412 с.
4. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Бареева М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик. Печатный двор, 2014. 500 с.
5. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик. Печатный двор, 2014. 508 с.
6. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Экспериментальная физика атмосферы. Л. Гидрометеоздат, 1990. 462 с.
7. Сулаквелидзе Г.К., Библиашвили Н.Ш., Латчева В.Ф. Образование осадков и воздействие на градовые процессы. Л. Гидрометеоздат, 1965. 203 с.
8. Никифоров А.И. Термодинамика и теплопередача: Учебное пособие. Часть II. Основы газовой динамики ГТД. Университет ГА. СПб. 2014, 158с.
9. Зельдович Я.Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. М. Мир, 1966. 688 с.
10. Амиранашвили А.Г., Бурнадзе А.С., Двалишвили К.С., Геловани Г.Т., Глонти Н.Я. и др. Возобновление работ по борьбе с градом в Кахетии.
11. Труды Института геофизики. Тбилиси. Т. LXVI, 2016.14-26 с.
12. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. Л., Гидрометеоздат, 1967.