УДК 551.576; 551.509

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ УДАРНОЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ СТАНЦИЯХ

А.Ж. ХАЧАТРЯН¹, В.Н. АГАБЕКЯН², А.С. АКОПЯН^{2*}, Д.О. МОСОЯН¹

¹Национальный Политехнический Университет Армении, Ереван, Армения ²Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

*e-mail: aleksandr.akopjan@rambler.ru

(Поступила в редакцию 28 августа 2019 г.)

Проведено исследование физических процессов, протекающих при генерации ударной звуковой волны, осуществляемой на выходе сопла газогенераторной станции при выбросе в атмосферу со сверхзвуковой скоростью газовой смеси, образовавшейся в камере при сгорании газа. Осуществлено исследование спектральных характеристик возбужденной ударной звуковой волны и проведены соответствующие расчеты их зависимостей от высоты распространения волны. Рассчитаны зависимости интенсивностей полученных звуковых волн от частоты. Определены уровни интенсивностей воздействия звуковых волн на облака в зависимости от высоты их расположения. Полученные значения поверхностных плотностей энергии возбужденных звуковых волн на высотах 500 м, 750 м и 1000 м равны, соответственно, 0.258 Дж/м², 0.115 Дж/м², 0.064 Дж/м², из чего следует, что воздействия данных волн на градоопасные облака могут быть ощутимыми лишь на высотах порядка 500 м.

1. Введение

Борьба с градовыми явлениями, наносящими большой ущерб сельскому хозяйству, флоре и фауне, имеет серьезное экономическое значение для многих регионов мира. Для разрешения этой проблемы необходимо решить задачу воздействия на градоопасные облака для регулирования их естественного хода развития [1,2]. Особенность воздействия на облака заключается в том, что приходится иметь дело с большими объемами в несколько десятков кубических километров. Через границы облаков происходит интенсивный обмен массой и энергией с окружающей средой. Энергетика процессов образования градоопасных облаков столь велика, что прямое энергетическое воздействие на них практически невозможно [1], поэтому методы предотвращения градовых явлений должны быть основаны на поиске и использовании динамических методов воздействия на механизмы формирования облаков с тем, чтобы изменить протекание физических процессов в направлении разрушения облака, небольшим активным физическим, химическим или механическим воздействием, используя энергию неустойчивости атмосферы. Научной основой технологий воздействия на облака является изменение естественного хода процессов в градообразуемых очагах облаков путем реализации их фазовой и коллоидальной неустойчивости [3], для чего необходимо найти такое звено в цепи развития облака, воздействие на которое предотвратило бы формирование градовых образований и не привело бы к изменению экологической ситуации на соответствующей территории.

Апробировано множество различных подходов к воздействию на градоопасные облака, различающихся между собой моделями описания облаков, способами их распознавания, физическими принципами воздействия и способами и техническими средствами реализации активного воздействия на них. В зависимости от регионов и местных условий применяются различные методы борьбы с градовыми явлениями: авиационный, артиллерийский, ракетный и наземно-генераторный [4, 5].

В последнее время в различных странах мира для борьбы с градовыми явлениями получили наибольшее применение газогенераторные станции (ГГС) [6–9] использующие для воздействия на градоопасные облака генерированные ГГС ударные звуковые волны. Однако, до настоящего времени еще не осуществлена оценка степени воздействия звуковых волн на облака. В связи с этим, количественная оценка воздействия сгенерированной ГГС звуковой волны на градоопасные облака является актуальной задачей для оценки эффективности применения ГГС.

2. Определение и расчет характеристик звуковой волны создаваемой ГГС

Принцип действия ГГС заключается в возбуждении ими ударной звуковой волны (V3B), воздействующей на очаги градообразований в облаках [6, 7]. V3B возбуждается при выходе в атмосферу со сверхзвуковой скоростью из сопла ГГС газовой смеси, образуемой при сгорании в камере газов. При выходе из сопла поток газа сжимая встречный воздух образует область сжатого воздуха, движущуюся вертикально вверх и возбуждающей при своем продвижении У3B. При распространении У3B происходит механическое возвратно-поступательное движение молекул, сопровождаемое процессом сжатия и расширения воздуха, приводящее к коагуляции паров воды в облаках и соответствующему ускорению осадкообразования в областях будущих градообразований развивающихся градоопасных облаков [10].

Для разгона потока сгоревших газов до сверхзвуковой скорости в ГГС используется сопло Лаваля, представляющее собой трубу с конической поверхностью переменного сечения, состоящую из сужающейся и выходной расширяющейся частей. В сужающейся части скорость потока газов увеличивается от начального значения до скорости звука в горловине. В расширяющейся же части наблюдается дальнейшее увеличение скорости потока [11].

Если энергию, выделяемую при сгорании газа в камере ГГС взять равной 2×10^6 Дж [12], то часть ее, преобразуемая в кинетическую энергию выходящего из сопла газа, равна 1.4×10^6 Дж., если КПД сопла Лаваля ~70%. На основании выражения $E_{\rm kin} = mV^2/2$, учитывая, что m = 0.65 кг [12] получим скорость выхода газов в атмосферу V = 2000 м/с.

Подсчитаем значение высоты h, на которой ударная волна преобразуется в звуковую, т.е. на которой скорость передвижения УЗВ спадет до скорости звука. Рассмотрим энергетическое уравнение, описывающее движение потока газа, выходящего из сопла ГГС, предполагая, что он распространяется только в вертикальном направлении. Пренебрегая потерями, можно считать, что энергия выходящего из сопла газа E расходуется на поднятие объёма воздуха, ограниченного телесным углом сопла, на высоту h для преодоления сил упругости, возникающих при сжатии встречного на пути потока газа воздуха и сообщения ему определенной скорости движения V. На основании закона сохранения энергии можно записать:

$$E = \frac{m(h)V^2}{2} + m(h)gh + P_0h^3\Delta\Omega , \qquad (1)$$

где m(h) – значение массы воздуха данного объёма на высоте h, P_0 – давление внутри перемещаемого слоя воздуха. Беря значения V = 350 м/с, $E = 1.4 \cdot 10^6$ Дж, $P_0 = 130$ атм [13], $\Delta \Omega = 1/36$ стереорадиан и рассчитав m(h) по формуле $m(h) = \rho \Delta \Omega h^3/3$, получим значение высоты равное 7.5 м. На данной высоте расчитаные значения составляющих уравнения (1) следующие - энергии затрачиваемой на сжатие воздуха, 0.238×10^6 Дж. (17 % энергии сгорания), - энергии, расходуемой на поднятие вверх воздуха, 0.14×10^5 Дж. (1% энергии сгорания), и внутренней энергии поднимаемого объёма воздуха 1.148×10^6 Дж. (82% энергии сгорания).

Как известно, динамика систем с изменяющейся массой описывается на основании уравнения Мещерского [13], имеющего следующий вид для нашего случая:

$$\frac{d}{dt}[m(t)v(t)] = -m(t)g - P_0h^2(t)\Delta\Omega, \qquad (2)$$

где

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

Дополняя его законом сохранения массы

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

получим полную систему дифференциальных уравнений, определяющих временные зависимости массы m(t) и скорости u(t) движения слоя сжатого воздуха. Решая численными методами уравнения (2) и (3) получим для времени, в течении которого скорость ударной волны спадает до звуковой, значение $\tau = 6 \times 10^{-3}$ с. Для слоя сжатого воздуха в данном промежутке времени получаем соответствующие значения для массы воздуха m(t) = 3.75 кг и толщины слоя 0.08 м.

Основываясь на законах газовой динамики [11, 13] и пренебрегая действием силы тяжести на массу поднимаемого воздуха, рассмотрим движение элементарного объёма слоя воздуха толщиной dh, плотностью $\rho(h,t)$ и скоростью v(h, t) в момент времени движения t. Для этого случая можно записать следующие уравнения:

- закона сохранения массы

$$h^{2} \frac{\partial \rho(h,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \Big[\rho(h,t) v(h,t) h^{2} \Big] = 0, \qquad (4)$$

- закона сохранения импульса

$$h^{2} \frac{\partial v(h,t)\rho(h,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial h} \Big[h^{2} (p(h,t) + \rho(h,t)v^{2}(h,t)) \Big] = 0, \qquad (5)$$

- закона сохранения энергии

$$h^{2} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho(h,t)e(h,t) + \frac{\rho(h,t)v^{2}(h,t)}{2} \right]$$

$$+ \frac{\partial}{\partial h} \left[h^{2} \left(\rho(h,t) \left(e(h,t) + \frac{v^{2}(h,t)}{2} \right) + p(h,t)v(h,t) \right) \right] = 0,$$
(6)

где e(h,t) – внутренняя энергия данного элемента.

Общее решение дифференциальных уравнений (4)–(6) будет иметь вид

$$P = \frac{A_1}{h} f_1(h - vt) + \frac{A_2}{h} f_2(h + vt), \qquad (7)$$

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

Предполагая, что процесс деформации (сжатия и расширения) воздуха носит адиабатический характер, можно записать уравнение, описывающее движение звуковой волны, в виде

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - v^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial h^2} + \frac{2}{h} \frac{\partial P}{\partial h} \right) = 0, \qquad (8)$$

где величина $P = (P_0 - p_{atm})$ – избыточное давление (p_{atm} – атмосферное давление на уровне моря), а v – скорость звука, равная 350 м/с. Замена переменной P в (8) на переменную $P \cdot h$, преобразует данное уравнение в волновое уравнение Даламбера:

$$\frac{\partial^2 \psi(h,t)}{\partial t^2} - v^2 \frac{\partial^2 \psi(h,t)}{\partial h^2} = 0.$$
(9)

Ограничиваясь рассмотрением только расходящихся волн и представив функцию $\Psi(h,t)$ в виде $\Psi(h,t) = P(h,t)h$, уравнение второго порядка (9) можно привести к уравнению

$$\frac{\partial \psi(h,t)}{\partial t} - v \frac{\partial \psi(h,t)}{\partial h} = 0.$$
(10)

Данное волновое уравнение может быть решено на основе начального условия $\Psi(h,0) = \Psi_0(h)$, которое для исследуемой задачи можно представить в виде

$$\psi_0(h) = p_{\text{atm}}h, \quad \text{при } h < 7.5 \text{ м и } h > (7.5 + 0.08) \text{ м}$$

 $\psi_0(h) = 130 p_{\text{atm}}h, \quad \text{при } 7.5 \text{ м} < h < (7.5 + 0.08) \text{ м}.$

Легко увидеть, что решением (10) является функция начального условия $\Psi_0(h)$, с заменой переменной h на (h - vt), т.е.

$$\Psi(h,t) = \Psi_0(h - vt). \tag{11}$$

Поэтому в зависимости от высоты давление в сжатом слое воздуха убывает по гиперболическому закону при неизменной толщине слоя. Данное утверждение означает, что на всех высотах время существования звуковой волны $\Delta t = 0.08 \text{ м} / 350 \text{ м/с}$ имеет постоянное значение равное 2.3×10^{-4} с.

На основании (10), избыточное давление P в сжатом слое воздуха в момент достижения его высоты h можно представить в виде

$$P = \frac{\overline{P}}{h}\overline{h}, \qquad (12)$$

где $\overline{p} = 130 p_{\text{atm}}$, $\overline{h} = 7.5$ м.

Исходя из (10) и с учетом начального условия, давление звуковой волны можно представить в виде Фурье интеграла для гармонических сферических волн

$$P(h,t) = \frac{2\overline{P} \cdot \overline{h}}{\pi h} \int_0^\infty \frac{\sin\left[\omega \Delta t / 2\right]}{\omega} \cos\left[\omega(t - h / v)\right] d\omega.$$
(13)

Здесь подынтегральная функция $\sin[\omega \Delta t/2]/\omega$ определяет собой спектр звуковой волны, $\omega = 2\pi f -$ круговая частота колебания. На основании (13) распределение плотностей давления волн по частотам можно представить в виде

$$P_{\omega} = \frac{2\overline{P} \cdot \overline{h}}{\pi h} \cdot \frac{\sin\left[\omega \Delta t / 2\right]}{\omega}, \qquad (14)$$

где выражение $P_{\omega}d\omega$ представляет собой величину давления, создаваемого волнами в диапазоне частот $d\omega$. На рис.1 приводится рассчитанная согласно (14) зависимость P_{ω} от частоты для различных значений высот h (500 м, 750 м, 1000 м). Согласно рис.1, значение давления УЗВ по абсолютной величине в зависимости от частоты волн вначале уменьшается. При частотах же выше 10000 Гц оно быстро затухает стремясь к нулю.



Рис.1. Спектральная зависимость давления УЗВ (1 - h = 500 м, 2 - h = 750 м, 3 - h = 1000 м).

Как видно из рис.1, в различных областях частотного спектра давление УЗВ может принимать как положительные, так и отрицательные значения, т.е. звуковые волны в определенном частотном диапазоне сжимают, а в другом разжимают воздух.

Для гармонической звуковой волны значение интенсивности от частоты определяется, как

$$I_{\omega}(h) = \frac{P_{\omega}^2}{\rho v}.$$
(15)

На основании (14) и (15) нами были рассчитаны зависимости интенсивностей звуковой волны по частоте (рис.2) на разных высотах (500 м, 750 м, 1000 м). Как видно из рис.2, основная часть интенсивности звуковой волны сосредоточена в диапазоне до 2000 Гц.

Для оценки уровня интенсивности УЗВ воспользуемся формулой

$$L = 10 \cdot \lg \left(I / I_0 \right), \tag{16}$$

где $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² – уровень интенсивности звукового порога слышимости на частоте 1000 Гц.



Рис.2. Зависимость интенсивностей УЗВ от частоты (1 - h = 500 м, 2 - h = 750 м, 3 - h = 1000 м).

Для рассматриваемых значений высот (500 м, 750 м, 1000 м) рассчитанные зависимости величины *L* от частоты приведены на рис.3.

Общую (интегральную) интенсивность УЗВ можно определить, как

$$I(h) = \int_{0}^{\omega} I_{\omega}(h) d\omega.$$
 (17)

На основании (14) и (15) легко получить зависимость интенсивности УЗВ от высоты как

$$I(h) = 2.8 \cdot 10^8 / h^2 \,. \tag{18}$$

Согласно (18), значения интенсивностей УЗВ спадают по высоте и равны $I(500 \text{ м}) = 1120 \text{ Bt/m}^2$, $I(750 \text{ м}) = 500 \text{ Bt/m}^2$, $I(1000 \text{ м}) = 280 \text{ Bt/m}^2$.

Учитывая, что продолжительность звуковой волны равна 2.3×10⁻⁴ с,



Рис.3. Зависимость уровня интенсивностей УЗВ от частоты (1 - h = 500 м, 2 - h = 750 м, 3 - h = 1000 м).

можно определить количество энергии, переносимое УЗВ на квадратный метр, как $\Delta E(h) = I(h)\Delta t$: $\Delta E(500 \text{ м}) = 0.258 \text{ Дж/м}^2$, $\Delta E(750 \text{ м}) = 0.115 \text{ Дж/м}^2$, $\Delta E(1000 \text{ м}) = 0.064 \text{ Дж/м}^2$.

3. Заключение

Звуковые волны, возбуждаемые газогенераторными станциями, могут влиять на физические процессы в градоопасных облаках находящихся на растояниях 500 м, 750 м и 1000 м от поверхности земли. Полученные значения поверхностных плотностей энергии данных волн равны 0.258 Дж/м², 0.115 Дж/м², 0.064 Дж/м², что соответственно вполне достаточно для возбуждения физических процессов в них, поскольку, как показано в [10, 17], воздействие акустических полей с интенсивностей звука в 17 Вт/м² и более при непрерывном воздействии в течении 6 сек. активизирует коагалиционные процессы, при которых наблюдается тенденция к сдвигу максимума микроструктуры капель в облаках в сторону формирования больших капель, приводящих к формированию дождевых условий.

Для подтверждения полученных в работе результатов необходимо проведение соответствующих экспериментов по измерению интенсивностей УЗВ сгенерированных ГГС на разных высотах и последующим сравнением их с расчетными данными.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ: А.Ж. Хачатрян проводил теоретические расчеты. В.Н. Агабекян и А.С. Акопян учавствовали в написании текста статьи. Д.О.Мосоян учавствовал в оформлении статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. А.М. Боровиков, И.И. Гайворонский и др. Физика облаков. Ленинград. Гидрометеоиздат, 1961, 456 с.
- 2. А. Деннис. Изменение погоды засевом облаков. Москва. Мир. 1983, 272 с.
- Л.Г. Качурин. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Экспериментальная физика атмосферы. Л., Гидрометеоиздат. 1990, 462 с.
- 4. А.М. Абшаев, М.Т. Абшаев, М.В. Барекова, А.М. Малкарова. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик. Печатный двор, 2014, 500 с.
- 5. Г.К. Сулаквелидзе. Ливневые осадки и град. Л., Гидрометеоиздат. 1967, 412 с.
- 6. А.А. Варданян, Г.А. Галечян, В.Г. Перепелкин, И.П. Чунчузов. Журнал технической физики, 81(10), 144 (2011).
- 7. С.Р.Овсепян. Противоградовая станция. Евразийский патент N 016788. Int.Cl.A01G 15/00, 2012.

- U.Dr. Hermes, R. Sanchez. Analisis sobre el ruido generado por las explosiones de los canones antigranizo.Instituto de Astronomia y Meteorologia Universidad de Guadalajara MEXICO. 2006.
- 9. F.S. Escobar, MA.E. Escobar. Ruiz.Sistema de proteccion contra granizo. GEO Servicos Argentina. 2002.
- 10. **Т.В. Тулайкова, А.В. Мищенко, С.Р. Амирова.** Акустические дожди. М. Физматкнига, 2010, 142с.
- 11. **А.И. Никифоров.** Термодинамика и теплопередача: Учебное пособие. Часть II. Основы газовой динамики ГТД. Университет ГА СПб. 2014,158с.
- 12. А.Ж. Хачатрян, Г.Г. Суренян, А.В. Хоецян, В.Н. Агабекян, А.С. Акопян, Д.О. Мосоян. Вестник науки и образования. Часть 1. 57(3),7 (2019).
- 13. Я.Б. Зельдович. Теория ударных волн и введение в газодинамику. М. Мир, 1966, 688с.
- 14. Г.К. Сулаквелидзе, Н.Ш. Бибилашвили, В.Ф. Лапчева. Образование осадков и воздействие на градовые процессы. Л. Гидрометеоиздат. 1965, 203с.
- 15. **Х.М Калов, Р.Х. Калов.** Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозо-градовые облака и туманы. Нальчик, 2010, 297с.
- 16. Б.Д. Мейсон. Физика облаков. Л. Гимиз. 1961, 544с.
- 17. M.P. Foster, J.C. Paflam. J. Geophysics Research. 93, N D1,747(1988).

INVESTIGATIONS OF PHYSICAL PROCESSES GOING DURING THE GENERATION OF A SHOCK SOUND WAVE IN GAS-GENERATOR STATIONS

A.Zh. KHACHATRIAN, V.N. AGABEKYAN, A.S. HAKOBYAN, D.O. MOSOYAN

A study was made of the physical processes occurring during the generation of a shock wave carried out at the outlet of a nozzle of a gas-generator station, when emitted into the atmosphere, at a supersonic velocity of the gas mixture formed in the chamber during gas combustion. Investigations of the spectral characteristics of an excited shock sound wave was made as well as the corresponding calculations of its height of wave propagation dependences were carried out. The dependences of the intensities of obtained sound waves on the frequency were calculated. The intensity levels of the action of sound waves on the clouds were determined depending on the height of their location. The obtained values of the surface energy densities of the excited sound waves at heights of 500 m, 750 m and 1000 m are 0.258 J/m², 0.115 J/m², 0.064 J/m² respectively. In results, effects of these waves on hail clouds can be noticeable only at altitudes of the order of 500 m.