

03;08

## К вопросу стимулирования осадков акустическими волнами

© Г.А. Галечян

Институт прикладных проблем физики НАН Армении,  
Ереван, Армения  
e-mail: galechian@web.am

(Поступило в Редакцию 2 ноября 2004 г.)

Рассматриваются вопросы стимулирования осадков акустическими волнами. Анализируются процессы взаимодействия звуковых волн с частицами тумана и явления акустической коагуляции. Чтобы устранить затухание звука при удалении от источника в тумане, предложено использовать явление усиления звуковой волны в слабоионизованном газе.

Вопрос стимулирования осадков является современной, важной и актуальной задачей. Первые эксперименты в указанном направлении были выполнены еще в начале XX столетия [1]. Данная задача является составной частью более общей проблемы — воздействия на атмосферные процессы, куда входят рассеяние туманов, предотвращение градопадения, очистка воздушного бассейна от загрязнений фреонами, разрушительно действующими на озоновый слой Земли, и другие.

Стимулирование осадков считается одним из важнейших, потенциально возможных способов борьбы с засухой. Впервые искусственные осадки были вызваны в Нидерландах в 1931 г. засевом из самолета размельченной твердой углекислоты в переохлажденные облака. Интенсивность искусственных дождей была невелика из-за малой вертикальной протяженности облаков, подвергнувшихся воздействию реагентов, поэтому они не были оценены по достоинству.

После Второй мировой войны работы по стимулированию осадков сбросом реагентов на облака возобновились, выполнялись во многих странах и сопровождалась расчетами и анализом полученных результатов. В дальнейшем для искусственного получения осадков стали использовать и другие методы: электрические, акустические, лазерные [1].

В данной статье анализируются процессы стимулирования дождей акустическими волнами. Одним из основных недостатков этого метода является затухание звука при его распространении в атмосфере. Чтобы исключить этот недостаток, предлагается использовать явление усиления звуковых волн в слабоионизованном газе.

Рассмотрим публикации, в которых приведены результаты исследований, связанные с вопросом стимулирования осадков акустическими волнами [2–8]. В работе [2] анализируется действие температурных пульсаций, вызванных периодическим сжатием и расширением воздуха под влиянием звуковых волн, на процессы испарения капель. Показано, что капли определенного критического радиуса могут испаряться вследствие повышения температуры. Более крупные капли сохраняют свою температуру и под действием мощного акустического

поля могут укрупняться. В [3,4] для описания коагуляционного процесса на основе стохастического подхода и численного моделирования выполнен расчет изменения микроструктуры распределения размеров капель в однородном тумане под влиянием акустических волн. Получено, что при действии звуковых волн частотой 300 Hz и интенсивностью 140 dB в течение 5 s на облако с содержанием паров воды  $2 \text{ g/m}^3$  наблюдается тенденция к сдвигу максимума микроструктуры капель облака в сторону больших размеров. Через 15 min после озвучивания возникает вырожденный второй максимум в интервале размеров частиц, соответствующих осадкам (порядка  $500 \mu\text{m}$ ).

Рассмотрению процессов взаимодействия акустических волн со взвешенными частицами посвящены статьи [5,6]. Получено, что в такой системе развивается неустойчивое равновесие, которое приводит к коагуляции капель. Механизм коагуляции в данном случае определяется не парным притяжением двух частиц, как в [3,4], а коллективным полем, создаваемым гидродинамическим взаимодействием частиц.

Результатам экспериментальных исследований посвящена работа [8]. Опыты проводились с искусственным туманом в камере объемом  $500 \text{ m}^3$ . В качестве источника звука использовался низкочастотный генератор-сирена с максимальной мощностью 20 kW [9]. Излучение звуковой волны происходило через рупорное устройство. Измерения показали, что наиболее эффективным является звуковое поле с частотой 170–200 Hz. Небольшие интенсивности звука (до  $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ ) ускоряли рассеяние тумана в 20–30 раз и приводили к резкому изменению его микроструктуры. Проводились измерения также в натуральных условиях. Все опыты выполнялись в диапазоне частот 100–300 Hz с интенсивностью звука у выхода рупора 0.12–0.21  $\text{W/cm}^2$ , что соответствует 150 dB [10]. На расстоянии 30–40 m от источника звуковых волн наступало значительное изменение облачных капель, которое происходило тем быстрее и эффективнее, чем больше водность тумана. Звуковое поле с указанными параметрами вызывало изменение микроструктуры тумана. Эксперименты показали, что с увеличением мощности акустического

поля влияние звуковой волны на туман усиливается. В работе [8] приведен обзор работ по стимулированию осадков реагентами в ареале озера Севан, находящегося на высоте 1900 м над уровнем моря. Озеро Севан (с общей площадью зеркала около 1200 км<sup>2</sup>, окруженное Гегамским и Варденисским хребтами) рассматривается как уникальный полигон для проведения исследований стимулирования осадков акустическими волнами.

Основной принципиальной трудностью успешного развития акустического метода стимулирования осадков является преодоление процесса ослабления интенсивности звука по мере удаления от источника. При изотропном распространении акустической волны от источника, если звук не рассеивается и не поглощается, интенсивность убывает прямо пропорционально квадрату расстояния от источника. Однако, так как на самом деле в природе наблюдается и рассеяние, и поглощение, особенно в тумане, где эти процессы реализуются сильнее, чем в воздухе, ослабление звуковой волны при удалении от источника происходит еще быстрее. Это явление при натурных экспериментальных исследованиях влияния акустической волны на рассеяние звука в облаке наблюдалось в [7].

Для устранения затухания звуковой волны при ее распространении в тумане (удалении от источника) следует воспользоваться явлением усиления звуковой волны в слабоионизованном молекулярном газе. Этот эффект заключается в том, что при распространении акустической волны в среде с возбужденными состояниями молекул на колебательно-возбужденных уровнях происходит их безызлучательная  $VT$ -релаксация. Энергия из возбужденных состояний молекул переходит в волну, и происходит увеличение интенсивности звука. В [11–14] развита линейная теория распространения звуковой волны в молекулярном газе, которая не учитывает эффекты взаимного взаимодействия звуковой волны с усиливающей средой. В [15,16] построена теория распространения звуковой волны в молекулярном газе с учетом указанных эффектов.

Усиление акустических волн, полученных при помощи внешнего источника и распространяющихся вдоль положительного столба тлеющего разряда в молекулярных газах, экспериментально исследовалось в [17,18]. Измерения выполнялись в смеси азота и смеси азота с кислородом при давлении газа в разрядной трубке  $P = 78 \text{ mm Hg}$ . Внутренний диаметр трубки был равен 9,8 см. Звуковая волна частотой 170 Hz вводилась в разряд электродинамическим излучателем, прикрепленным к одному из торцов трубки. К противоположному торцу трубки, за электродом, был прикреплен микрофон.

Коэффициент усиления звуковой волны в разряде в азоте при токе 120 mA и интенсивности  $J = 72 \text{ dB}$  соответствовал  $K_i = 5.6 \text{ m}^{-1}$ . Добавление кислорода к азоту в разряд приводило к увеличению коэффициента усиления, и при 10% кислорода в смеси  $\text{N}_2 + \text{O}_2$   $K_i = 8 \text{ m}^{-1}$ . Это связано с тем обстоятельством, что

константа колебательной релаксации молекулы азота кислородом на два порядка больше, чем азота азотом. Уместно отметить, что скорость колебательной релаксации колебательно-возбужденных молекул азота молекулами воды на три порядка больше, чем азота азотом, т.е. малые примеси водяных паров в слабоионизованной плазме азота приводят к существенному росту коэффициента усиления звуковой волны. Поэтому актуальным является исследование усиления звука в слабоионизованной плазме молекулярных газов при повышенных давлениях, вплоть до атмосферного включительно.

Дальнейшая задача в проблеме стимулирования осадков акустическими волнами заключается в создании слабой ионизации воздуха для получения среды с колебательно-возбужденными молекулами на пути распространения звуковой волны. Такую ионизацию в тумане можно получить СВЧ волнами, лазерными лучами, электрическими полями. Здесь мы кратко проанализируем ионизацию атмосферы СВЧ полями, причем нас не будут интересовать некоторые явления, которые могут возникать под влиянием СВЧ волн, например изменение электрического потенциала облака и рост водяных капель, которые могут приводить к росту коагуляции, и другие.

В монографии [19] приводится теоретическое и экспериментальное рассмотрение образования искусственной ионизованной области (ИИО) в атмосфере воздуха высокочастотным электрическим полем. Анализируются возможности создания ИИО на высоте 30–40 км для образования устойчивой связи. Микроволновой разряд предполагается создавать в зоне пересечения двух или более пучков радиоволн. Описываются результаты экспериментальных модельных лабораторных исследований СВЧ разряда.

В [20,21] анализируются вопросы создания в тропосфере микроволнового разряда для очистки воздушного бассейна от загрязнения фреонами, разрушительно действующими на озонный слой Земли.

Безэлектродный разряд в воздухе возникает под влиянием переменного электрического поля. Электроны набирают в высокочастотном поле необходимую энергию для ионизации при столкновениях с нейтральными молекулами воздуха. Когда частота ионизации становится больше критической, наступает пробой газа. Плотность электронов и ионов при этом увеличивается экспоненциально со временем  $n_e \sim \exp(\gamma_i t)$ , где  $\gamma_i$  — частота ионизации, которая быстро возрастает с повышением переменного электрического поля.

Разряд, возбуждаемый пучком импульсов микроволнового излучения в газах высокого давления (до 500 mm Hg), описан в [19,21,22], рассматриваются результаты исследования СВЧ разряда (на длине волны  $\lambda_f \sim 2 \text{ cm}$ ) в воздухе импульсом длительностью  $\tau_f = 10\text{--}30 \mu\text{s}$  с частотой повторения  $f \sim 2 \text{ Hz}$ . Особенностью такого разряда является его пространственная неоднородность с высокой концентрацией электронов

в средней части ( $n_e \cong 10^{16} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) и температурой электронов  $T_e \cong 5 \text{ eV}$ , на периферии с  $n_e \cong 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  и электронной температурой  $T_e = 0.5 - 0.7 \text{ eV}$ . В течение первых  $10 \mu\text{s}$  после окончания микроволнового импульса происходит достаточно быстрый спад концентрации электронов и затем наблюдается переход на квазистационарное состояние с медленным распадом плазмы.

Оценим время  $V-T$ -релаксации в микроволновом разряде при давлении воздуха  $700 \text{ mm Hg}$ . На поздних стадиях распада температура газа в плазме существенно понижается, примем ее  $300 \text{ K}$ . В чистом азоте константа  $V-T$ -релаксации  $k_{VT} \cong 10^{-16} \text{ cm}^3/\text{s}$  [23], константа тушения азота кислородом примерно  $k_{VT} = 2.3 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^3/\text{s}$  [24], константа тушения азота молекулами воды в области температур от  $300$  до  $963 \text{ K}$  составляет, согласно [25],  $k_{VT} \cong 10^{-13} \text{ cm}^3/\text{s}$ . Для тумана (смеси  $\text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) время колебательной  $V-T$ -релаксации можно определить по формуле [24]

$$\frac{1}{\tau_{VT}} = \frac{1}{\tau_{VT1}} \frac{P_1}{P} + \frac{1}{\tau_{VT2}} \frac{P_2}{P} + \frac{1}{\tau_{VT3}} \frac{P_3}{P}, \quad (1)$$

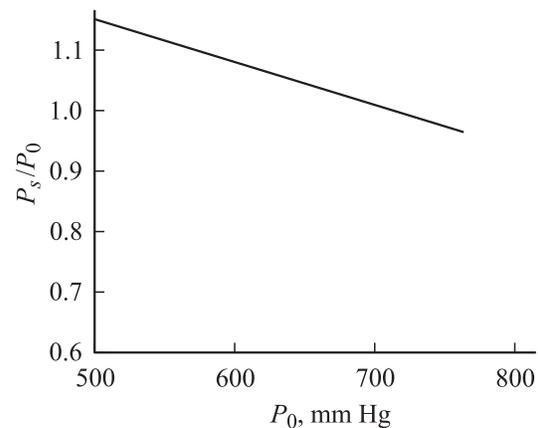
где  $P_1, P_2, P_3$  — парциальное давление азота, кислорода и паров воды в воздухе соответственно;  $\tau_{VT1}, \tau_{VT2}$  и  $\tau_{VT3}$  — времена релаксации азота азотом, азота кислородом и азота водой соответственно.

Примем, что в воздухе паров воды  $2 \text{ g/m}^3$ , что соответствует в рассматриваемых условиях парциальному давлению порядка  $1 \text{ mm Hg}$ . Вычисление по приведенной формуле показывает, что в плазме воздуха с парами воды время релаксации колебательных уровней азота  $\tau_{VT} \cong 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ . Если учесть, что облучение тумана должно происходить звуковой волной с частотой  $f = 100 - 300 \text{ Hz}$ , то  $\tau_{VT} < \tau_s$ , т.е. частота релаксации колебательно-возбужденных уровней молекул в тумане значительно выше частоты акустических колебаний и в такой среде звуковая волна будет усиливаться.

Результаты исследования, приведенные в [21,22,26], вселяют надежду, что в полевых условиях можно получить СВЧ разряд. Плазма такого разряда распадается достаточно медленно, поэтому при частоте повторения импульсов микроволнового разряда в сотни  $\text{Hz}$  в течение нескольких секунд возможно создание плазменного образования, которое можно облучать звуковой волной, получить ее усиление и на значительных расстояниях реализовать стимулирование осадков. Для зондирования больших пространств следует производить синхронное сканирование пучками радио- и звуковых волн.

Рассмотрим зависимость относительного звукового давления от высоты над уровнем моря. Для этого воспользуемся формулой  $P_s = \sqrt{2J\rho V_s}$  [27], где  $J$  — интенсивность звуковой волны,  $\rho$  — плотность газа,  $V_s$  — скорость звуковой волны.

На рисунке представлена зависимость относительного звукового  $P_s/P_0$  давления от величины атмосферного давления или высоты над уровнем моря.  $P_0$  — звуковое давление при атмосферном давлении  $760 \text{ mm Hg}$



Зависимость относительного звукового давления от величины атмосферного давления при температуре воздуха  $T = 0^\circ\text{C}$ .

(озеро Севан находится на высоте  $1900 \text{ m}$ , что соответствует атмосферному давлению порядка  $600 \text{ mm Hg}$ , а Иссык-Куль — на высоте  $1600 \text{ m}$ , что соответствует  $\sim 620 \text{ mm Hg}$ ). Из приведенного графика следует, что при постоянной интенсивности  $J = 150 \text{ dB}$  и температуре воздуха  $t = 0^\circ\text{C}$  с уменьшением давления относительное звуковое давление увеличивается и опыты по стимулированию осадков эффективнее производить на полигонах, расположенных на больших высотах над уровнем моря.

В заключение отметим следующее: из рисунка следует, что чем выше над уровнем моря будет происходить стимулирование осадков из облаков акустическими волнами, тем эффективнее произойдет этот процесс при постоянной интенсивности звука. Кроме того, наиболее эффективное стимулирование осадков произойдет, когда акустический генератор с излучателем будут находиться на летательном аппарате. Тогда акустические волны, распространяющиеся сквозь облако в направлении, противоположном движению аппарата, будут оставлять прокоагулированный след в виде капель воды в облаке. В качестве летательного аппарата может быть использован, в частности, вертолет, который может выбирать высоту полета и перемещаться сквозь облако, где плотность влаги наибольшая, и приводить к максимальному эффекту коагуляции. При оптимально подобранных параметрах акустического генератора и многократном прохождении вертолета сквозь облака в разных направлениях произойдет стимулированное выпадение осадков.

Этот метод может быть использован для рассеяния облаков, предрасположенных к образованию града. Применение его уберет регионы, часто подвергающиеся бедствиям градобития, от природных катастроф.

В заключение выражаю благодарность Э.А. Арутюняну за полезные обсуждения вопросов, изложенных в данной статье.

## Список литературы

- [1] Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 256 с.
- [2] Александров Э.Л., Седунов Ю.С. // Тр. Института прикладной геофизики. Л., 1965. Вып. 1. С. 39.
- [3] Foster M.P., Paflam J.C. // J. Weather Modif. 1985. Vol. 17. N 1. P. 38–44.
- [4] Foster M.P., Paflam J.C. // J. Geophysical Research. 1988. Vol. 93. N D1. P. 747–758.
- [5] Немцов Б.Е., Эйрман В.Я. // Акуст. журн. 1989. Т. 35. Вып. 5. С. 882–886.
- [6] Немцов Б.Е. // ДАН СССР. 1990. Т. 314. № 2. С. 355–358.
- [7] Вальцев В.В., Махарашивили А.З., Хоргуани В.Г. // Тр. Института прикладной геофизики. Л., 1965. Вып. 1. С. 47–50.
- [8] Арутюнян Э.А., Казарян Р.А. // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. 1999. № 7 (19). Вып. 2. С. 79–82.
- [9] Вальцев В.В., Хоргуани В.Г. // Акуст. журн. 1961. Т. 6. Вып. 1.
- [10] Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1988. 217 с.
- [11] Коган Е.Я., Мальцев В.П. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 3. С. 653–655.
- [12] Bauer H.-J., Bass H.E. // Phys. Fluids. 1973. Vol. 16. N 7. P. 988–996.
- [13] Коган Е.Я., Молевич Н.Е. // Изв. МВ и ССО СССР. Физика. 1986. № 7. С. 53–58.
- [14] Осипов А.И., Уваров А.В. // Инж. физ. журн. 1988. Т. 55. Вып. 1. С. 149–164.
- [15] Коган Е.Я., Молевич Н.Е. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 941–943.
- [16] Елецкий А.В., Степанов Е.В. // Хим. физ. 1989. Т. 8. № 9. С. 1247–1250.
- [17] Галечян Г.А., Мкртчян А.Р. // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 3. С. 314–318.
- [18] Галечян Г.А., Мкртчян А.Р. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 27. Вып. 14. С. 68–73.
- [19] Борисов Н.Д., Гуревич А.В., Милих Г.М. Искусственная ионизованная область в атмосфере. М., 1986.
- [20] Гуревич А.В., Литвак А.Г. и др. // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170. № 11. С. 1118–1202.
- [21] Батанов Г.М., Грицинин С.И., Косый И.А. и др. // Тр. ФИАН. 1985. Т. 160. С. 174.
- [22] Gritsinin S.I., Kossyi I.A., Silakov V.P., Tarasova N.M. // XVIII ICPIG. Invited Papers. Swansea, 1987. P. 232.
- [23] Lukasik S., Young J. // J. Chem. Phys. 1957. Vol. 27. P. 1149.
- [24] Кондратьев В.Н. Кинетика химических газовых реакций. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 690 с.
- [25] Whitson M., Mcneal R. // J. Chem. Phys. 1977. Vol. 66. P. 2696.
- [26] Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Бархударов А.Э. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 9. С. 1198–2010.
- [27] Бергман Л. Ультразвук. М.: ИЛ, 1956.