

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

А.Г. МКРТЧЯН¹, А.Р. АРАМЯН^{1*}, Л.Ш. ГРИГОРЯН¹, Г.Ф. ХАЧАТРЯН¹,
Г.А. АРУТЮНЯН¹, Л.Э. ХАЧИКЯН¹, Г.Р. АРАМЯН²

¹Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

²Центр гидрометеорологии и мониторинга МОС РА, Араратский АГЦ,
Арташат, Армения

*e-mail: aramyan.artur@gmail.com

(Поступила в редакцию 18 февраля 2022 г.)

Работа посвящена исследованию различных видов излучений (акустических и электромагнитных волн), вызванных ударной волной. Предполагается, что эти излучения являются результатом вихревых движений газа, генерируемых ударной волной. Из разных вихрей излучаются различные по частоте волны.

1. Введение

Взаимодействие акустических волн с заряженными частицами исследуется долгое время и имеется большое количество опубликованных работ. Эти работы можно разделить на два направления. Первое направление – воздействие акустических волн на совокупность заряженных частиц или на плазму. К ним относятся, например, влияние на такие параметры плазмы, как напряженность электрического поля внутри плазмы, распределение концентрации заряженных частиц [1,2]. Акустические волны также могут воздействовать на совокупность заряженных частиц и вызывать излучение электромагнитных волн в различных диапазонах – от УНЧ до светового [3–5]. Второе направление – влияние плазмы на параметры акустических волн. Во-первых, это усиление звука и неустойчивости в плазме [6]. И, конечно же, влияние плазмы на параметры акустических волн, такие как скорость распространения, длина волны, соответственно, резонансная частота и т.д. [2].

Исследования последних лет в области электромагнитного излучения в земной атмосфере показали важность этих работ. В частности, в [4] показано, что сильные ударные волны или сверхзвуковые летающие объекты воздействуют на атмосферу и атмосфера «откликается» на такое воздействие электромагнитными волнами. «Отклик» атмосферы проявляется в УНЧ диапазоне, СЧ диапазоне, в УВЧ и в световом диапазоне [3,6]. Ионизация атмосферы ударной волной изучается давно и имеется ряд публикаций на эту тему [7]. Излучение таких

ионизированных частиц мало изучено. По этой причине возникает необходимость в более детальном изучении этого явления. Особенно важно исследовать границу между зоной разрежения и зоной сжатия, где возникает турбулентное движение. Именно из этих областей излучаются акустические и электромагнитные волны.

2. Эксперимент и результаты

Работа выполнена с использованием противорадовой акустической установки, которая описана в [4,5]. Такая установка может генерировать ударные волны со скоростью 4–4.5 Маха, и эти волны могут достигать высоты 5–6 км за 4–5 с. Акустическая пушка производила выстрелы каждые 5–7 секунд. В ходе эксперимента проводилось одновременное измерение частот электромагнитного и акустического излучений. Измерения параметров электромагнитного излучения проводились с помощью кольцевой антенны диаметром 60 м, усилителя звуковой частоты (50–50000 Гц), амплитудно-цифрового преобразователя (12 разрядов) и компьютера. Измерение параметров акустического излучения проводились с использованием микрофона, усилителя звуковой частоты (50–50000 Гц), амплитудно-цифрового преобразователя (12 разрядов) и компьютера. Антенна для приема низкочастотных электромагнитных волн во время эксперимента располагалась недалеко от акустической пушки, примерно 10–15 м.

Исследования с более чувствительными устройствами, например, с усилителем звуковой частоты с большей чувствительностью, привели к новым результатам. Новые результаты показаны на Рис.1 и Рис.2. На Рис.1 приведено изменение зависимости спектрального распределения акустических волн, генерируемых ударной волной, по времени. Как видно из Рис.1, регистрируются не только ранее

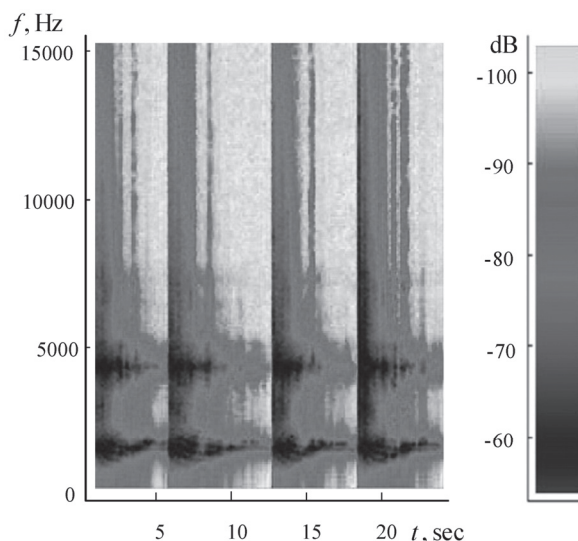


Рис.1. Спектр акустического излучения. Излучение возникает в результате воздействия ударной волны.

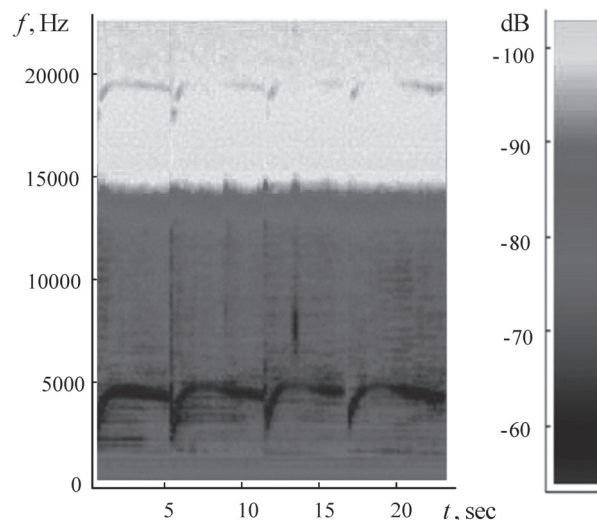


Рис.2. Спектр электромагнитного излучения. Излучение возникает из-за ударной волны.

зарегистрированные акустические волны 1.1–1.5 кГц, но и более высокие акустические волны 4–4.5 кГц. Как было показано в работе [4], излучения генерируются позади фронта ударной волны в результате вихревого движения газа. А от частоты вихревого движения зависит частота излучения. Из Рис.1 можно заметить, что возникают, по крайней мере, два типа вихрей, которые генерируют акустические волны с частотами 1.1–1.5 кГц и 4–4.5 кГц. В тоже время аналогичное явление наблюдается также и в процессе электромагнитного излучения (Рис.2). Как видно из Рис.2 регистрируются не только ранее зарегистрированные волны с частотой 4.1–4.5 кГц, но и электромагнитные волны с более высокими частотами 18–19 кГц.

3. Обсуждение

Соответствие и различие между частотами акустического и низкочастотного электромагнитного излучений рассмотрено в [4], где это объясняется тем, что ударная волна порождает вихревое движение воздуха, в котором движутся заряженные частицы и излучают низкочастотные электромагнитные волны. Разница между частотами магнитных и акустических волн обусловлена Доплеровским смещением.

В данной работе мы представляем приемлемый, на наш взгляд, механизм генерации акустических и низкочастотных электромагнитных волн, которые регистрируются после ударной волны.

Теоретические исследования распространения ударной волны обычно проводятся следующим образом: предполагается, что разрыв стоит, а газ совершает сверхзвуковое течение [8]. Мы также приняли то же предположение. Для начала рассмотрим сверхзвуковое движение газа, например, ударные волны. Для большей ясности обсудим зависимость обтекаемости потока газа вокруг

цилиндрического препятствия от скорости потока.

В области малых чисел Рейнольдса, т. е. при $R < 1$, линии скорости вокруг цилиндра имеют такой вид, как на Рис.3а. Если теперь мы увеличим скорость потока, так что число Рейнольдса станет несколько больше единицы, то увидим, что поток изменится. Как показано на Рис.3б, за сферой возникнут вихри. До сих пор неясно, существовали ли вихри и при малых числах Рейнольдса или же они возникают неожиданно при некотором определенном числе? Обычно считался, что циркуляция нарастает постепенно. Однако теперь думают, что скорее она проявляется неожиданно и возрастает с увеличением R . Во всяком случае, поток в районе от $R = 10$ до $R = 30$ меняет свой характер. За цилиндром образуется пара вихрей.

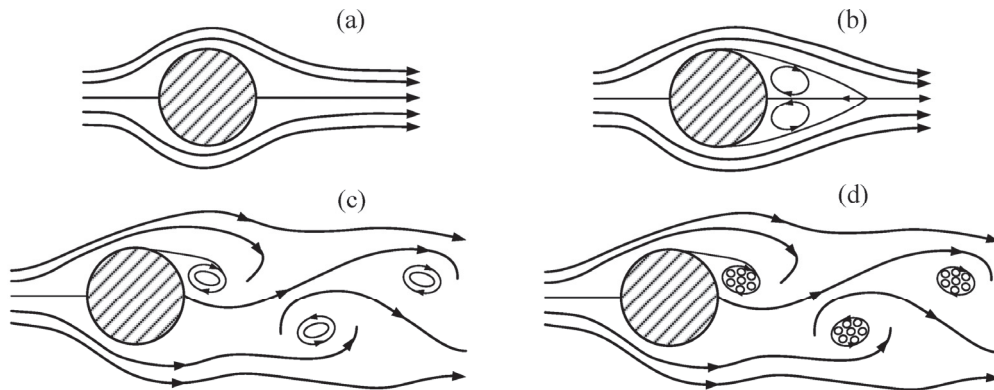


Рис.3. Линии скорости вокруг цилиндра при различных числах Рейнольдса. (а) $R < 1$; (б) $10 < R < 30$; (с) $R > 40$; (д) $R > 1000$.

Когда число Рейнольдса проходит через значения в районе 40, поток снова меняется. Характер движения претерпевает неожиданное и резкое изменение. Один из вихрей за цилиндром становится настолько длинным, что он отрывается и плывет вниз по течению вместе с газом. При этом газ за цилиндром снова закручивается и возникает новый вихрь. Эти вихри поочередно отслаиваются то с одной, то с другой стороны, так что в какой-то момент поток выглядит приблизительно так, как показано на Рис.3с.

Такой поток вихрей называется вихревой цепочкой Кармана. Она всегда появляется для чисел Рейнольдса $R > 40$. Фотография такого потока показана на Рис.4.

Разница в режиме между двумя потоками, изображенными на Рис.3а,б или с, очень велика. На Рис.1а,б скорость постоянна, тогда как на Рис.3с скорость в любой точке изменяется со временем. Выше $R = 40$ стационарное решение отсутствует. Для таких более высоких чисел поток изменяется со временем некоторым регулярным периодическим образом создаются вихри.

Можно представить себе физическую причину возникновения этих вихрей. Мы знаем, что на поверхности цилиндра скорость газа должна быть равна нулю,

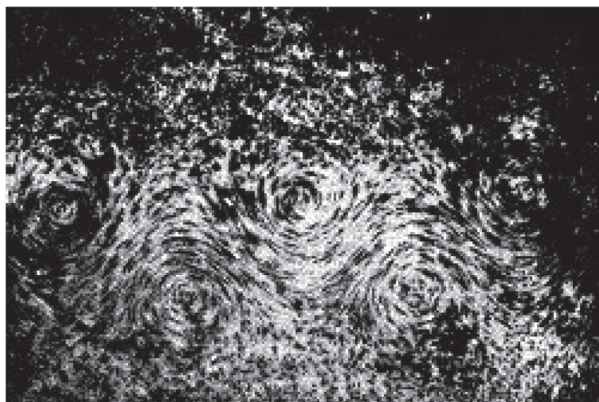


Рис.4. Фотография вихревой цепочкой Кармана.

но при удалении от поверхности скорость быстро возрастает. Это большое местное изменение скорости жидкости и создает вихри. Когда скорость основного потока достаточно мала, у вихрей хватает времени, чтобы продиффундировать из тонкого слоя вблизи поверхности твердого тела, где они создаются, и «расплываться» на большую область.

По мере возрастания скорости у вихря остается все меньше и меньше времени, чтобы «расплываться» на большую область газа. К тому моменту, когда число Рейнольдса достигнет нескольких тысяч, вихри начинают заполнять тонкую ленту (Рис.3d). В таком слое поток хаотичен и нерегулярен. Такая область называется пограничным слоем, и этот нерегулярный поток с увеличением R пробивает себе путь все дальше и дальше по течению. В области турбулентности скорости очень нерегулярны и «беспорядочны», вдобавок поток больше не двумерный – он крутится во всех трех измерениях. Кроме того, на турбулентное движение налагается еще регулярное переменное движение.

При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса область турбулентности пробивается вперед, пока при потоке с R , превышающим 10^5 , не достигнет места, где линии тока огибают цилиндр. При этом мы получаем так называемый «турбулентный след».

Подобное явление очень хорошо видно на Рис.5. На рисунке приведены последовательные моменты (1–4) вылета пули из пистолета. Как видно, позади пули возникает вихревое движение газа.

Обсудим теперь вопрос излучения акустических и электромагнитных волн, вызванных ударной волной. По всей вероятности, акустические волны генерируются вследствие вихревого движения газа. Как было выяснено из выше сказанного, когда поток переходит границу турбулентности, возникают различные по форме и скоростям вихревые потоки газа. В этом и есть причина образования разных по частотам акустических волн. Как известно, ударные волны ионизируют атмосферу [4,5,7]. А круговое движение заряженных частиц генерирует электромагнитные волны. Частота этих генерируемых электромагнитных волн будет зависеть от формы и скорости вихревого движения газа, как и в случае с акустикой.

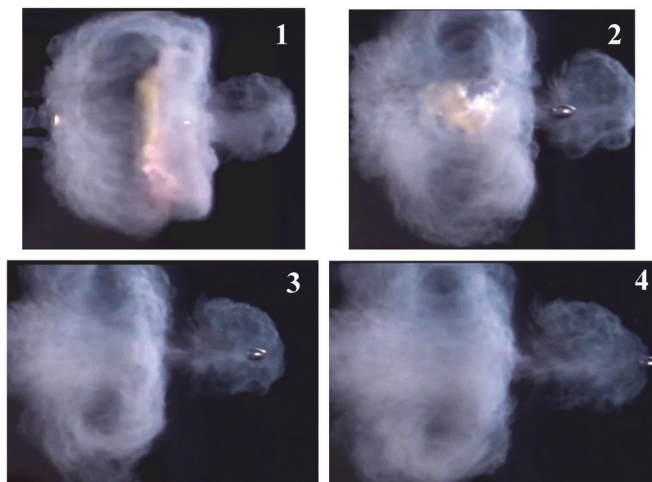


Рис.5. Изображение процесса выстрела (пистолета) в разные промежутки времени, скорость пули 400(м/с): 1 – 0.25 мс; 2 – 0.35 мс; 3 – 0.5 мс; 4 – 0.6 мс.

В работах [9,10] приведены экспериментальные результаты о состоянии газоразрядной плазмы в сверхзвуковом потоке газа. Показано, что переход потока газа от ламинарного к турбулентному сопровождается рядом явлений. Например, электрический ток газоразрядной плазмы начинает колебаться, и частота этого колебания совпадает с вращательной частотой вихревого движения газа, возникающей при турбулентном потоке. Приведенные в работе осциллограммы показывают, что увеличение скорости потока приводит к увеличению частоты колебаний газоразрядного электрического тока. В тоже время, помимо колебания электрического тока было зафиксировано излучение электромагнитных волн той же частоты.

4. Заключение

В итоге можно сделать следующие выводы. Ударные волны генерируют вихревой поток газа, форма и скорость которого зависит от скорости ударной волны. Такие движения газа образуют акустические волны разных частот. А когда в таком движении участвуют также заряженные частицы, то мы получаем электромагнитные волны разной частоты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках научного проекта 20DP-1C04.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.A. Antinyan, G.A. Galechyan, L.B. Tavakalyan. Acta Acustica, **82**, 619 (1996).
2. G.A. Galechyan. Physics-Uspekhi, **38**, 1309 (1995).
3. Y.G. Rapoport, O.K. Cheremnykh, V.V. Koshovy, M.O. Melnik. E.N. Tkachenko. Annales Geophysicae, **35**, 53 (2017).

4. **A.R. Aramyan, S.A. Aramyan, S.G. Bilén, L.S. Grigoryan, H.F. Khachatryan.** Chinese Physics Letters, **32**, 034101 (2015).
5. **A.H. Mkrtchyan, L.Sh. Grigoryan, H.F. Khachatryan, S.G. Bilen, M. Parrot, A.V. Sargsyan, A.R. Aramyan.** IEEE Transactions on Plasma Science, **47**, 118 (2019).
6. **U. Ingard,** Phys. Rev., **145**, 41 (1966).
7. **Ya.B. Zel'dovich, Yu.P. Raizer.** Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena, Dover Publications Inc., 2003.
8. **L.D. Landau, E.M. Lifshitz.** Fluid Mechanics, Oxford, Pergamon Press, 1987.
9. **G.A. Galechyan, S.I. Petrosyan.** Teplofiz. Vys. Temp., **14**, 931 (1976).
10. **G.A. Galechyan, S.I. Petrosyan.** J. Appl. Mech. Tech. Phys., **16**, 844 (1975).

ՀԱՐՎԱԾՈՂ ԱԼԻՔՆԵՐԻՑ ԳԵՆԵՐԱՑՎԱԾ ԱԿՈՒՍՏԻԿ ԵՎ
ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՄԱԿԱՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Ա.Հ. ՄԿՐՏՅԱՆ, Ա.Ռ. ԱՐԱՄՅԱՆ, Լ.Շ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Հ.Ֆ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ,
Գ.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Լ.Խ. ԽԱՉԻԿՅԱՆ, Գ.Ր. ԱՐԱՄՅԱՆ

Աշխատանքը նվիրված է հարվածող ալիքներից տարբեր տեսակի ճառագայթումների (ակուստիկ և էլեկտրամագնիսական ալիքների) ուսումնասիրություններին: Ենթադրվում է, որ այդ ճառագայթումները հետևանք են հարվածող ալիքից գեներացվող գազի մրրկաձև շարժման: Տարբեր մրրիկներից ճառագայթվում է տարբեր հաճախության ալիքներ:

STUDIES OF ACOUSTIC AND ELECTROMAGNETIC WAVES GENERATED FROM SHOCK WAVE

A.H. MKRTCHYAN, A.R. ARAMYAN, L.Sh. GRIGORYAN, H.F. KHACHATRYAN,
G.A. HARUTYUNYAN, L.E. KHACHIKYAN, G.R. ARAMYAN

The work is dedicated to the study of different types of radiation (acoustic and electromagnetic waves) from shock waves. These radiations are thought to be the result of a whirlwind of gas generated by the shock wave. Waves of different frequencies radiate from different vortexes.