

04; 08; 12

© 1992

## О ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ МПК-РАЗРЯДОМ, РАБОТАЮЩЕМ В ГАЗЕ В ЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ

А.М. Семенов

Как известно [1-3], электрический разряд магнитоплазменного компрессора (МПК) в газе высокой плотности является мощным широкополосным источником излучения и импульсных давлений. Эти свойства такого типа разряда уже в настоящее время находят применение в ряде важных научных и практических приложений [4] и характерны для одноимпульсного режима работы, когда интервал между разрядными импульсами составляет десятки или сотни секунд. При работе такого устройства в импульсно-периодическом режиме с частотой  $f \approx 1-10$  Гц одной из его особенностей, о которой ранее не сообщалось, является возможность генерации мощных низкочастотных (инфразвуковых) колебаний в среде, где он развивается. Любые другие типы электрических разрядов (см., например, [5]), в принципе, также являются источниками инфразвука, однако интенсивность его мала.

Среди известных источников инфразвука следует отметить прежде всего источники естественного происхождения (метеорологические, сейсмические и вулканические явления [6]), которые характеризуются случайным характером возникновения и потому непредсказуемы. Источники инфразвука, связанные с человеческой деятельностью (взрывы, ударные волны от сверхзвуковых самолетов, шум двигателей и технологического оборудования [7]), создают звуковые колебания в широком спектральном диапазоне, в том числе и в области инфразвуковых частот. Однако использование таких источников в лабораторных исследованиях является неэффективным как из-за их малой интенсивности в области инфразвуковых частот, так и из-за больших материально-технических затрат, связанных с обслуживанием, размещением и эксплуатацией установок:

В настоящей статье рассмотрена возможность создания на основе МПК-разряда, работающего в газе в частотном режиме, генератора инфразвуковых колебаний. Конструктивно он может быть выполнен подобно описанному в [1].

Излучение инфразвуковых колебаний в таком устройстве происходит при импульсно-периодическом режиме работы с частотой  $f \approx 1-10$  Гц. При подаче на электроды поджига иницирующего импульса в межэлектродном зазоре генератора возникает сильноточный электрический разряд. Ускорение плазмы в направлении оси системы сопровождается образованием в газе сильных импульсных давлений амплитудой порядка  $A \approx 10^8 - 10^9$  Па с характерной

длительностью  $\tau \sim 10^{-5}$  с [2]. При этом длительность процесса излучения инфразвука составит  $T_{\text{пр}} \approx N/f \approx 10^4 - 10^5$  с при характерном значении количества импульсов (ресурсе электродов генератора)  $N \approx 10^4$  импульсов. Рассматривая последовательность генерируемых импульсов давления как периодическую функцию и считая эту последовательность бесконечной, поскольку  $T_{\text{пр}} f \gg 1$ , ее можно разложить в ряд Фурье на участке  $-T_{\text{пр}}/2 < t < T_{\text{пр}}/2$  [8]:

$$F(t) = \frac{A\tau}{T_{\text{пр}}} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2A}{\pi k} \cdot \sin\left(k \frac{\pi\tau}{T_{\text{пр}}}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T_{\text{пр}}} \cdot t\right), \quad (1)$$

который для частот  $f \leq 20$  Гц будет иметь вид:

$$F(t) = \frac{A\tau}{T_{\text{пр}}} + \sum_{k=1}^{20} \frac{2A}{\pi k} \cdot \sin\left(k \frac{\pi\tau}{T_{\text{пр}}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_{\text{пр}}} \cdot t\right). \quad (2)$$

Для инфразвуковых колебаний с частотой  $f \leq 20$  Гц с учетом того, что  $\tau \sim 10^{-5}$  с и  $k \frac{\pi\tau}{T_{\text{пр}}} \rightarrow 0$ , получаем:

$$\sin\left(k \frac{\pi\tau}{T_{\text{пр}}}\right) \approx k \frac{\pi\tau}{T_{\text{пр}}}. \quad (3)$$

Тогда амплитуда инфразвуковых колебаний будет равна

$$A_{\text{и}} \approx \frac{2\tau}{T_{\text{пр}}} \cdot A. \quad (4)$$

Проведем сравнительный анализ возможных источников инфразвука. Как следует из (4), при условии равенства  $\tau/T_{\text{пр}}$  для различных процессов амплитуда инфразвуковых колебаний пропорциональна амплитуде импульса давления, генерируемого в среде, которая для сильных ударных волн в газе с начальной плотностью  $\rho_0$  оказывается равной [9]:

$$A = \frac{\gamma+1}{2} \rho_0 v^2. \quad (5)$$

В (5) единственной величиной, зависящей от способа создания импульсного давления, является скорость распространения фронта импульса давления. Поэтому при выборе возможных источников для генерации инфразвука следует рассматривать те, которые дают максимальное значение  $v$ . К таким источникам относятся плазодинамический МПК-разряд, взрывные источники и сильноточные разряды типа „Z-пинч“.

В случае использования МПК-разряда амплитуда импульсного давления уже при умеренных энергопотребительских параметрах разрядного контура оказывается сравнимой лишь с амплитудой ударных волн, генерируемых взрывными источниками [11]. Однако последние не позволяют реализовать продолжительный импульсно-периодический режим работы устройства. Кроме того, для их эксплуатации необходимы специальные взрывные камеры. Другим возможным источником инфразвука может быть сильнооточный разряд типа Z-пинча [5, 11], работающий в частотном режиме. Но при идентичных начальных условиях (сорт, плотность газа и запасаемая электрическая энергия), что и у МПК-разряда, скорость фронта импульса давления, создаваемого в среде таким разрядом, составляет  $\sim 1-2$  км/с, т.е. оказывается в 4-5 раз ниже, чем у МПК [11]. Эффективность генерации инфразвука при этом будет ниже в 16-25 раз.

Для оценки эффективности работы такого генератора инфразвука рассмотрим МПК-разряд в воздухе нормальной плотности, параметры которого описаны в [1, 2]. При запасаемой электрической энергии емкостного накопителя  $W_{эл} = 11$  кДж в импульсно-периодическом режиме работы с частотой  $\sim 1-10$  Гц амплитуда импульса давления достигает величины  $A = 7.5 \cdot 10^8$  Па при длительности импульса  $\tau \approx 2 \cdot 10^{-5}$  с. При этом амплитуда инфразвуковых колебаний для частот  $f \leq 20$  Гц составляет  $A_{\omega} = 3 \cdot (10^4 - 10^5)$  Па.

В заключение следует отметить, что, согласно проведенным оценкам, параметры инфразвука, создаваемого генератором на основе МПК-разряда в газе, вполне достаточны для использования его в ряде важных приложений. Для конкретной реализации генератора необходимо лишь устранить звуковые и световые эффекты, сопровождающие его работу, которые в рассматриваемом случае являются нежелательными.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Семенов А.М. // Тез. докл. 1 Всесоюз. симпозиума по радиационной плазмодинамике. М.: Энергоатомиздат, 1989. Ч. 1. С. 80-81.
- [2] Семенов А.М. // ПТЭ, 1991. № 5. С. 184-187.
- [3] Камруков А.С., Козлов Н.П., Протасов Ю.С., Семенов А.М. // ЖТФ. 1982. Т. 52 № 11. С. 2314-2317.
- [4] Камруков А.С., Козлов Н.П., Протасов Ю.С. // Плазменные ускорители и ионные инжекторы. М.: Наука, 1984. С. 5-49.
- [5] Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Физика сильнооточных электроразрядных источников света. М.: Атомиздат, 1976. 174 с.
- [6] Бреховских Л.А. Акустика океана. М.: Наука, 1974. 375 с.

- [7] Х о р б е н к о И.Г. Звук, ультразвук, инфразвук. М.:  
Знание, 1986. 139 с.
- [8] К о р н Г., К о р н Т. Справочник по математике. М.:  
Наука, 1970. 720 с.
- [9] З е л ь д о в и ч Я.Б., Р а й з е р Ю.П. Физика удар-  
ных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.  
М.: Наука, 1966. 686 с.
- [10] П о п о в Е.Г., Ц и к у л и н М.А. Излучательные свой-  
ства ударных волн в газах. М.: Наука, 1977. 124 с.
- [11] Г р и б к о в В.А., Ф и л и п п о в Н.В. // Препринт  
ФИАН СССР. 1979. № 94. 21 с.

Поступило в Редакцию  
6 июля 1992 г.