

Моделирование ударных волн при большой частоте повторения лазерных искр

В.Н.Тищенко*, Г.Н.Грачев*, А.И.Гулидов**, В.И.Запругаев**, В.Г.Посух*

Показано, что цуг лазерных искр с большой частотой повторения может создавать в воздухе единую ударную волну большой протяженности. Эта волна либо идентична волне, возникающей при мгновенном поглощении энергии цуга в одной искре, либо одновременно содержит ультразвуковые и низкочастотные компоненты.

Ключевые слова: лазерная искра, моделирование, ударные волны.

Одиночные или периодические (с малой частотой повторения) лазерные искры создают ударные волны (УВ), описываемые теорией точечного взрыва [1]. В работе [2] осуществлен оптический пульсирующий разряд (ОПР) с частотой повторения искр F до ~ 100 кГц. В настоящей работе в рамках задачи о преобразовании лазерного пучка в плазменный в свободном газовом пространстве [3] с помощью лазерных искр с большой частотой повторения смоделировано создание УВ, профиль которой зависит от F и энергии искр Q и отличается от ранее известного.

1. Теория

Уравнения газовой динамики решались численно, учитывались свойства воздуха при высокой температуре. Было принято, что пакет из N импульсов с частотой повторения F коаксиально-симметрично нагревает область, длина которой L много больше ее радиуса (цилиндр). Время нагрева $t_0 \approx 1$ мкс, давление $p_0 = 1$ атм, радиус первой искры $R_0 = 0.5$ см, ввод энергии близок к осуществленному в эксперименте [4]. В качестве энергетического параметра принято отношение энергии, поглощенной в искре, к энергии холодного газа в объеме искры: $E = Q/Q_0$.

УВ исследовались при фиксированной суммарной энергии искр в пакете $Q_s = \sum_1^N Q_i$ (i – номер искры). Если искры в пакете имеют одну и ту же энергию Q , то параметр $E_s \equiv Q_s/Q_0 \approx EN$ описывает УВ, создаваемую одной мощной искрой с энергией Q_s . В настоящей работе для определенности принято $E_s = 1000$. На рис.1 показаны УВ, создаваемые при разных частотах повторения десятью искрами ($N = 10$, $E = 100$). Давление и расстояние по радиусу нормированы на p_0 и R_0 соответственно.

Если время между искрами $T_s \approx F^{-1}$ меньше времени T_r релаксации высокого давления в зоне нагрева (зависит от E и R_0), то пакет искр формирует УВ, которая слабо

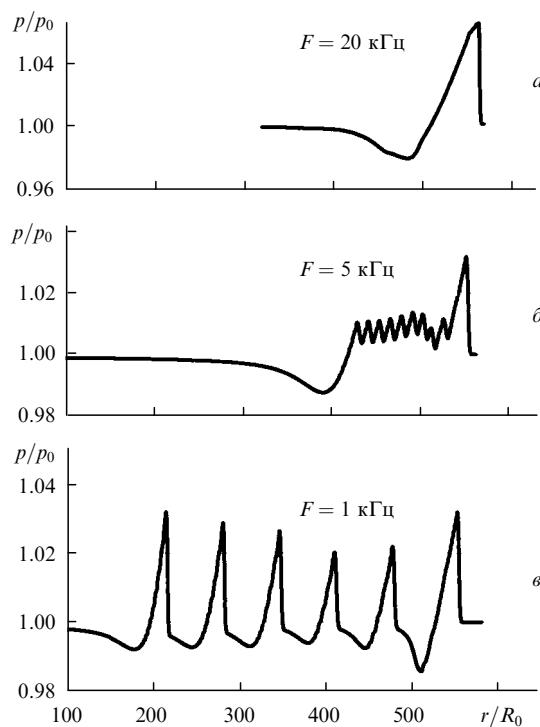


Рис.1. Расчет распределения давления по радиусу в УВ, создаваемых цугом искр с разной частотой повторения (момент времени $t = 8$ мс).

отличается от УВ, создаваемой одной искрой с энергией $Q_s = Q_0 E_s$ (рис.1,а). При уменьшении F создается УВ с большой протяженностью фазы сжатия $R_+ \sim c_0 N/F$ (рис.1,б, c_0 – скорость звука в воздухе), а фаза пониженного давления имеет примерно такую же протяженность, как и в случае $E = E_s$.

Высокочастотная компонента за фронтом соответствует возмущениям от каждой УВ (ультразвук при малых E или R_0). УВ между собой не взаимодействует, если за время T_s каждая УВ отходит от плазменного канала на расстояние, большее протяженности УВ, создаваемой одной искрой (рис.1,в). Из расчетов следует, что при одной и той же энергии E_s , уменьшая E и увеличивая N , можно создать УВ большой протяженности. Условие существования описанного выше эффекта имеет вид $-t_0 \ll T_r$.

*Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. ак. Лаврентьева, 13/3

**Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

2. Эксперимент

Аргон под высоким давлением подавался в форкамеру, из которой поступал в трубку (длина 4 см, диаметр 7 мм, скорость газа ~ 20 м/с) и далее – в атмосферу. ОНР создавался на оси трубки при фокусировке импульсно-периодического излучения CO_2 -лазера [5] (длительность импульсов ~ 1 мкс, в ОНР поглощалось ~ 650 Вт). ОНР создавал тепловую «пробку», что приводило к срыву его горения и периодическому формированию пугов лазерных искр. Определялось влияние частоты повторения лазерных искр $F \approx 8 - 64$ кГц на спектр звука, создаваемого ОНР.

На рис.2 показаны спектры звука ОНР при разных F (сигнал фона вычитался). Суммарная интенсивность звука составляла ~ 125 дБ, интенсивность фона – 85 дБ. При $F = 8$ и 20 кГц преобладал ультразвук, при больших частотах повторения искр ОНР формировал ультразвук и низкочастотный звук. Расчеты показали, что звук с частотой $f \gg F$ создавался за счет пульсации ударных волн в объеме трубки, причем излучала плазменная струя на выходе из трубки. Излучение боковой поверхности трубки сильно поглощалось. Звук с частотой $f \ll F$ создавался искрами с $F > 25$ кГц, что согласуется с расчетом, приведенным для условий нашего эксперимента.

Таким образом, при вводе энергии в газ с большой частотой повторения могут создаваться периодические УВ, как низкочастотные, так и одновременно обладающие низкой и высокой частотами. Данный эффект является «сильным» в энергетическом отношении – УВ уносят $\sim 25 - 50$ % поглощаемой мощности.

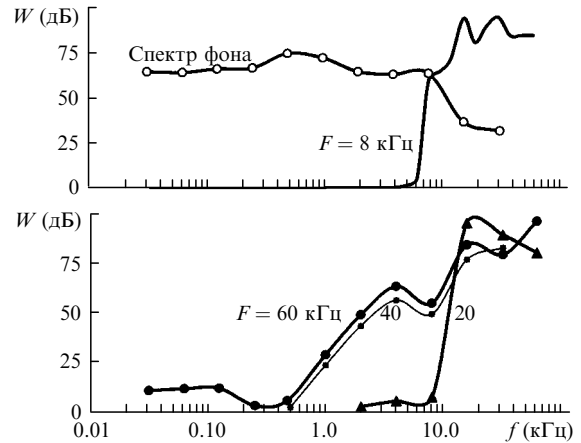


Рис.2. Экспериментальные спектры звука, создаваемого оптическим пульсирующим разрядом при разных частотах повторения импульсов лазерного излучения F , а также спектр фона. Измерения проведены в диапазонах частот $f \pm f/2$ (октавные измерения).

Авторы выражают благодарность А.Г.Пономаренко за полезные обсуждения и поддержку. Работа поддержана РФФИ (грант № 00-02-17482).

1. Бункин Ф.В., Комиссаров В.М. *Акуст.ж.*, № 3, 307 (1973).
2. Третьяков П.К., Гаранин А.Ф., Грачев Г.Н., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н., Яковлев В.Н. *ДАН*, **351**, 339 (1996).
3. Тищенко В.Н., Гулидов А.И. *Письма в ЖТФ*, **24**, № 19, 77 (2000).
4. Тищенко В.Н., Антонов В.М., Мелехов А.В., Никитин С.А., Посух В.Г., Шайхисламов И.Ф. *Письма в ЖТФ*, **22**, 30 (1996).
5. Grachev G.N., Ponomarenko A.G., Smirnov A.L., Shulyat'ev V.V. *Proc.SPIE*, **4165**, 185 (2000).