

Эффект Доплера для оптического разряда – источника ударных волн

В.Н.Тищенко

Рассмотрен эффект Доплера для движущегося оптического пульсирующего разряда, создающего периодические ударные волны. Проявления эффекта ограничены механизмом объединения волн. Найдены условия применимости эффекта в случае пульсирующего источника ударных волн.

Ключевые слова: оптический пульсирующий разряд, механизм объединения ударных волн, эффект Доплера.

В работе продолжены исследования квазинепрерывного «резонансного» взаимодействия оптического пульсирующего разряда (ОПР) с газом, которое основано на свойствах ОПР и на механизме объединения ударных волн (МОВ) [1, 2]. ОПР создается импульсно-периодическим лазерным излучением в движущемся фокусе пучка. При определенном сочетании параметров излучения и среды («резонанс», действует МОВ) ударные волны, создаваемые искрами ОПР, объединяются между собой и формируют квазистационарную волну, которая имеет большую длину и высокое давление [1, 2]. Применение лазеров большой мощности с частотой следования импульсов ~ 100 кГц [3, 4] открывает перспективу использования ОПР и МОВ в аэрокосмических приложениях [2, 5–9].

Актуальность изучения эффекта Доплера (далее – эффект) связана с тем, что ОПР является уникальным источником звука [10]: ему присущи точечные размеры, ударные волны, излучаемые плазмой, имеют плотность мощности $10\text{--}20$ кВт/см³, эффективность преобразования составляет $\sim 30\%$; действие МОВ ограничивает проявление эффекта (см. ниже). Отличие ОПР от источников звука состоит в следующем. Цуги импульсно-периодического лазерного излучения создают поле волн, в котором отношение мощности в низкочастотной компоненте к полной мощности поля $\delta \sim f$ (f – частота повторения импульсов в цугах, следующих с частотой F , причем $F \ll f$). При большой частоте f значение $\delta \sim 1$. В акустических же источниках величина $\delta \sim F/f$, поэтому $\delta \ll 1\%$. ОПР позволит решить проблему точечных источников инфразвука с высокой эффективностью преобразования. В работах Ф.В.Бункина отмечалось, что возникновение инфразвука возможно при взаимодействии цугов лазерных импульсов с жидкостью, в основе его лежит метод модуляции плотности, при котором $\delta \sim F/f$. Условия для проявления МОВ в экспериментах [11] отсутствовали.

Эффект заключается в различии между излучаемой источником звука частотой f и регистрируемой приемником частотой f_g . Если источник приближается к неподвижному приемнику со скоростью V_0 , то формула Доплера имеет вид [12]

$$f_g = \frac{f}{1 - M_0}, \quad (1)$$

где $M_0 = V_0/C_0$; C_0 – скорость звука в газе; приемник расположен на линии z , вдоль которой движется источник.

Отличие ОПР от акустического источника связано с действием МОВ: на расстоянии от ОПР, составляющем

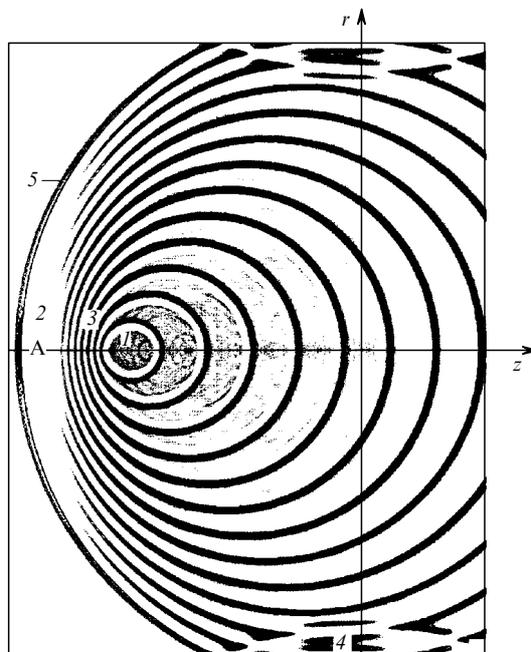


Рис.1. Фрагмент поля ударных волн для момента времени $t = 1.04$ мс. В целом поле волн имеет форму шара, поверхность которого соответствует ударной волне 5 от первой искры. ОПР движется влево вдоль оси z из точки пересечения осей z и r . Черным цветом обозначено повышенное давление в фазе сжатия (А – положение «датчика»; 1 – ОПР; 2 – дальняя зона (пульсации давления малы); 3 – ближняя зона; 4 – отраженные от стенки ударные волны).

В.Н.Тищенко. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: tishenko@mail.nsk.ru

Поступила в редакцию 14 июня 2005 г., после доработки – 18 июля 2005 г.

$0 - 10R_d$ [1, 2], происходит изменение структуры излучаемого сигнала. (Здесь $R_d = (q/P_0)^{1/3}$ – динамический радиус (м); q – энергия искр (Дж); P_0 – давление газа (Па).) В предельном случае формируется квазистационарная волна и приемник измеряет возрастающий со временем сигнал.

ОПР создает периодические ударные волны, скорость которых V на начальной стадии движения много больше C_0 , и на расстоянии $\sim R_d$ величина V становится равной C_0 . Если расстояние между точкой наблюдения Z_m и местом нахождения ОПР Z_j велико, то можно считать, что ударные волны имеют скорость C_0 . Частота f_g начинает

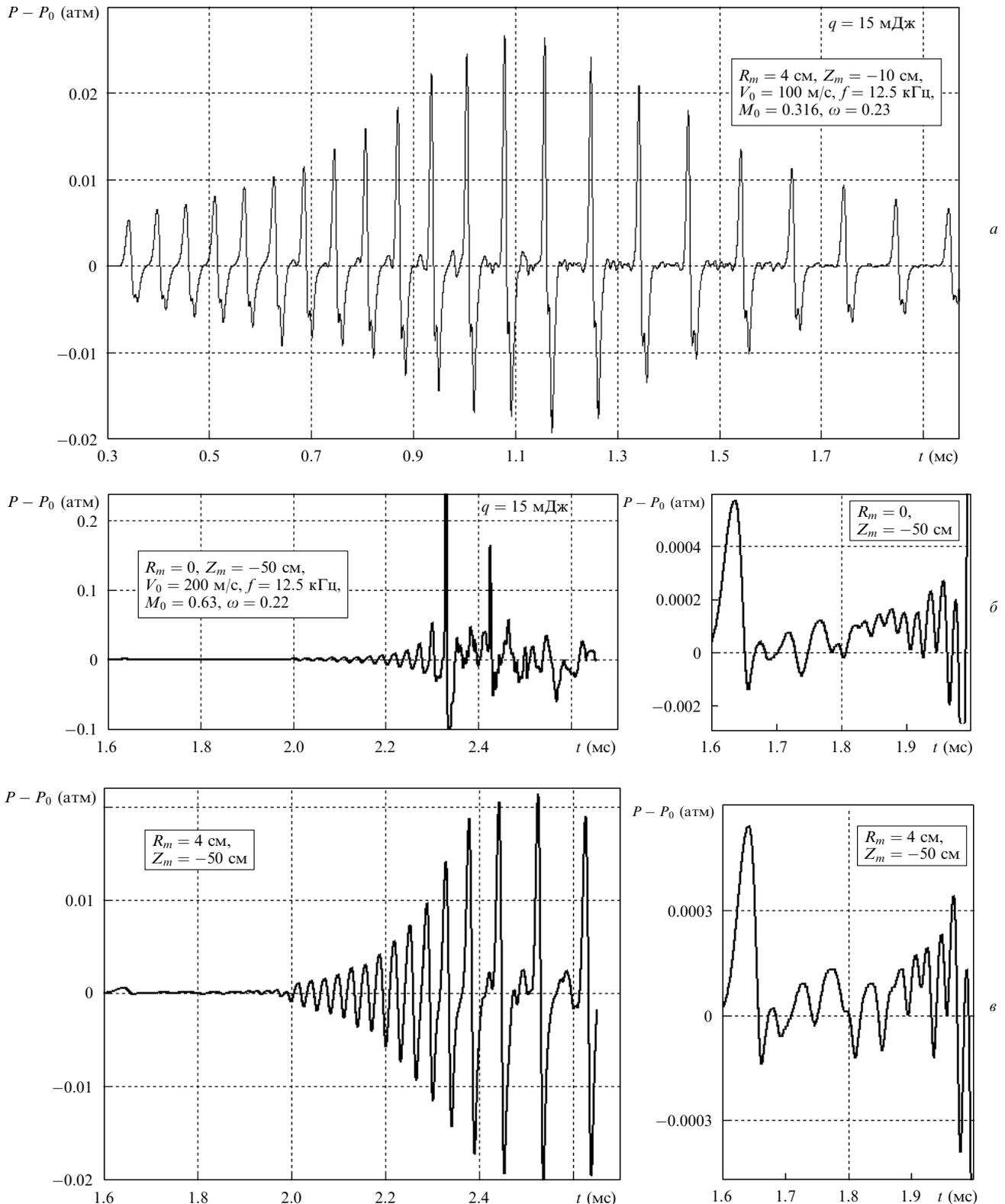


Рис.2. Изменение во времени давления газа в точках с координатами R_m и Z_m . Параметры, использованные в расчете: ОПР с частотой $f = 12.5$ кГц и энергией $q = 15$ мДж движется в аргоне ($P_0 = 1$ атм) влево из точки $Z = 0$ со скоростью $V_0 = 100$ (а) и 200 м/с (б, в).

заметно зависит от V , когда ОПР приближается к приемнику на расстояние $Z_m - Z_j < 3R_d$. Эффект определяется при измерении большого числа волн. Для ОПР это означает, что $Z_m - Z_j \gg R_d$.

Для проявления эффекта необходимо, чтобы частота f_g прихода ударных волн на приемник соответствовала условию (1), что выполняется в некоторой области параметров f, q, V_0, C_0, P_0 (далее – область D).

Цель работы заключается в поиске области D . Границы ее находились из критериев МОВ [1, 2] и проверялись с использованием расчетов в двухмерном осесимметричном приближении. Искры задавались в виде сферических областей поглощения энергии за время ~ 0.2 мкс. В момент времени $t = 0$ ОПР стартует из точки $Z = 0$ и движется со скоростью V_0 к «приемнику», который расположен в точке $Z_m/R_d \approx 100$. На рис. 1 показан расчет поля ударных волн, когда параметры ОПР соответствуют границе области D . При сопоставлении результатов расчета с формулой (1) принято, что f – частота пульсаций ОПР, а f_g – частота прихода ударной волны в точку наблюдения; значение f_g получено из расчета.

На рис. 2 показано распределение давления газа в точках с координатами Z_m, R_m (R_m – расстояние от оси z до точки наблюдения). При малой скорости ОПР и $R_m = 0$ частота f_g соответствует полученной по формуле (1). Если $R_m > 0$ (рис. 2, а, в), то по мере приближения ОПР к приемнику сказывается геометрический фактор. При $t > 1$ мс ОПР удаляется от приемника и f_g уменьшается. На рис. 2, б, в показаны сигналы, искаженные действием МОВ. Как видно из рис. 1 и рис. 2, б, в, перед движущимся ОПР формируется область, состоящая из двух зон. К ОПР примыкает короткая зона, где давление регулярно пульсирует. На малом расстоянии от точки наблюдения необходимо учитывать зависимость f_g от скорости ударной волны. Частоты пульсаций давления в дальней зоне не соответствуют эффекту, ее длина растет со временем.

На рис. 3 показана область проявления эффекта, найденная из критериев МОВ. Здесь $\omega = fR_d/C_0$ – приведенная частота пульсаций ОПР. Формулу (1) можно выразить через ω и M_0 :

$$\omega_g = \frac{\omega}{1 - M_0}. \quad (2)$$

Область D , в которой ω_g удовлетворяет соотношению (2), ограничена условием $\omega_0 > \omega < \omega_1$, где

$$\omega_0 \approx 2.5M_0, \quad (3)$$

$$\omega_1 \approx 0.65(1 - M_0). \quad (4)$$

Кривые пересекаются в точке с координатами $\omega_{\text{crit}} = 0.52, M_{0\text{crit}} = 0.206$. При $\omega > \omega_0$ ОПР нестабильно создает ударные волны [2], наблюдение эффекта затруднено. При $\omega > \omega_1$ различие в форме ударных волн (рис. 2, б, в), создаваемых ОПР, и измеряемого сигнала связано с действием МОВ, роль которого возрастает по мере приближения к кривой ω_2 . При $\omega > \omega_2 = 5.88(1 - M_0)^{1.5}$ ОПР создает квазистационарную волну. Подставляя (4) в (2), находим предельную воспринимаемую приемником частоту $\omega_{g1} \sim 0.65$, которая удовлетворяет формуле (2).

Справедливость формул (3), (4) подтверждена расчетами. Так, на рис. 3 ряд черных точек с координатами $\omega = 0.22$ и $M_0 = 0.316, 0.63, 0.8$ относится к серии расчетов, для которых давление показано на рис. 2. Точки $\omega =$

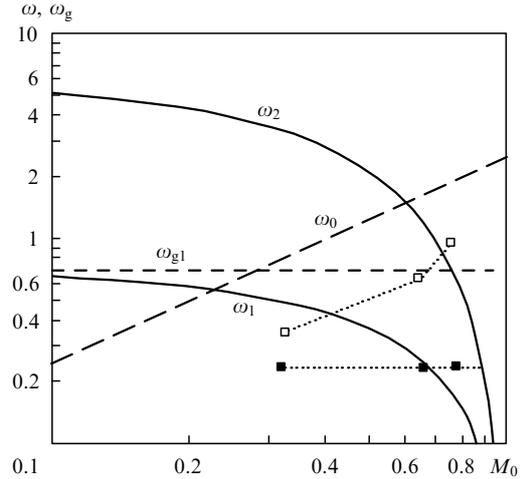


Рис. 3. Граничные частоты пульсаций ОПР ω и воспринимаемая датчиком частота ω_g в зависимости от скорости M_0 движения ОПР. При $\omega < \omega_0$ ОПР стабильно создает ударные волны. Ниже кривой ω_1 ударные волны не взаимодействуют между собой, выше ω_2 они создают квазистационарную волну. Черные точки – параметры (ω, M_0) ОПР в расчете, светлые точки – воспринимаемые датчиком частоты ω_g . Точки с координатами $M_0 = 0.316$ и 0.63 относятся к расчетам, представленным на рис. 1, а и 2, б, в; ω_{g1} – предельная воспринимаемая датчиком частота, соответствует излучаемой частоте ω_1 .

0.22 и $M_0 = 0.316$ находятся в области D , что подтверждается расчетом (см. рис. 2, а). Точки $\omega = 0.22, M_0 = 0.62$ и 0.8 находятся на границе или вне области D , что видно из рис. 1 и 2, б. На рис. 3 черным точкам соответствуют светлые точки, отвечающие значениям ω_g , рассчитанным по формуле (2). Светлая точка $\omega_g = 0.32, M_0 = 0.316$ находится ниже ω_{g1} – предельной воспринимаемой частоты. Она определяет истинное значение частоты ω_g , воспринимаемой датчиком. Светлые точки, находящиеся выше ω_{g1} , не могут быть использованы для обозначения частоты ω_g . Они показаны для иллюстрации существования предельного значения $\omega_g = \omega_{g1} \sim 0.65$.

Сделаем оценку. Для определенности примем следующие параметры: воздух, $P_0 \approx 10^5$ Па, $C_0 = 340$ м/с, $V_0 = 100$ м/с ($M_0 = 0.294$), $q = 100$ Дж. Найдем максимальную частоту f_1 следования импульсов, начиная с которой эффект не проявляется. Так как $M_0 > M_{0\text{crit}}$, то частота ω ограничена величиной ω_1 . Из (4) находим $f_1 = 0.65(C_0 - V_0)(P_0/q)^{1/3} = 1560$ Гц.

Частота ω_g подчиняется соотношению (2), если ОПР имеет параметры из области D и находится на большом расстоянии от приемника. Однако при $(Z_m - Z_j)/R_d < Z_b \sim 3$ частота ω_g зависит от скорости ударной волны, а не от C_0 . Определим число искр и ударных волн, которые создаст ОПР на длине Z_b . Формулы (3) и (4) представим в виде

$$Z_s > Z_{s0} \approx 0.4 \text{ при } 0 < M_0 < M_{0\text{crit}}, \quad (5)$$

$$Z_s > Z_{s1} = \frac{1.5M_0}{1 - M_0} \text{ при } M_{0\text{crit}} \leq M_0 < 1. \quad (6)$$

Здесь $Z_s = (Z_j - Z_{j-1})/R_d$ – расстояние между искрами. Область D соответствует неравенству $Z_{s0} < Z_s > Z_{s1}$. Выражения (3), (4) и (5), (6) являются разными формами записи критериев проявления эффекта Доплера. Количество искр и ударных волн есть $N_v \approx Z_b/Z_s$. Полагая $Z_s = Z_{s0}$ и $Z_s = Z_{s1}$, получаем $N_{v0} = Z_b/Z_{s0} \approx 6$ при $0 < M_0$

$< M_{0crit}$ и $N_{v1} = Z_b/Z_{s1} \approx 2(1/M_0 - 1)$ при $M_{0crit} \leq M_0 < 1$. Для $M_0 = 0.5$ значение $N_{v1} = 2$.

Таким образом, механизм объединения ударных волн ограничивает область параметров ОПР, при которых можно наблюдать эффект Доплера. Критерии проявления эффекта применимы для разных газов и параметров ОПР, значения которых (C_0 и P_0 , V_0, f и q) учитываются в выражениях для ω и M_0 .

Работа поддержана РФФИ (грант № 03-02-17716) и СО РАН (грант № 152).

1. Тищенко В.Н. *Квантовая электроника*, **33** (9), 823 (2003).
2. Тищенко В.Н., Аполлонов В.В., Грачев Г.Н., Гулидов А.И., Запрягаев В.И., Меньшиков Я.Г., Смирнов А.Л., Соболев А.В. *Квантовая электроника*, **34** (10), 941 (2004).
3. Третьяков П.К., Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. *Докл. РАН*, **336** (4), 466 (1994).
4. Аполлонов В.В., Кийко В.В., Кислов В.И., Суздальцев А.Г., Егоров А.Б. *Квантовая электроника*, **33** (9), 753 (2003).
5. Mugafo L.N., Raizer Yu.P. *AIAA Paper № 94-2451* (1994).
6. Третьяков П.К., Гаранин А.Ф., Грачев Г.Н., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. *Докл. РАН*, **351** (3), 339 (1996).
7. Тищенко В.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **11** (2-3), 228 (1998).
8. Аполлонов В.В., Тищенко В.Н. *Квантовая электроника*, **34** (12), 1143 (2004).
9. Тищенко В.Н., Гулидов А.И. *Письма в ЖТФ*, **26** (19), 77 (2000).
10. Тищенко В.Н., Грачев Г.Н., Запрягаев В.И., Смирнов А.В., Соболев А.В. *Квантовая электроника*, **32** (4), 329 (2002).
11. Божков А.И., Бункин Ф.В., Коломенский Ал.А., Маляровский А.И., Михалевич В.Г. *Труды ФИАН*, **156**, 123 (1984).
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Гидродинамика* (М.: Наука, 1986).