

Спектр ударных волн, создаваемых оптическим разрядом при высокой частоте повторения импульсов лазерного излучения

В.Н.Тищенко*, Г.Н.Грачев*, В.И.Запругаев**, А.Л.Смирнов*, А.В.Соболев**

В связи с изучением ускорения плазменной струи оптическим пульсирующим разрядом выполнен эксперимент, в котором оптический разряд генерировал периодические ударные волны или ударные волны, объединенные в периодические цуги. При частоте повторения $f > 50$ кГц в спектре периодических волн преобладала линия на частоте f . Спектр цугов, следовавших с частотой $F_0 \ll f$, содержал ультразвуковую и низкочастотную компоненты. Цуги создавали сильный звуковой эффект. Средняя мощность волн достигала 160 Вт, эффективность преобразования лазерного излучения в ударные волны составляла $\sim 10 - 25\%$.

Ключевые слова: ударные волны, оптический разряд, плазменная струя.

1. Введение

Ударные волны (УВ), создаваемые одиночными лазерными искрами, изучены достаточно полно [1–8]. При большой частоте повторения лазерных импульсов исследовалось возбуждение звука в жидкости, которое не сопровождалось фазовыми переходами [9–16]. В сверхзвуковом потоке газа получен оптический пульсирующий разряд (ОПР), инициируемый импульсно-периодическим лазерным излучением с частотой повторения до ~ 100 кГц [17]. ОПР создает след с высокой температурой и низкой плотностью газа, а также УВ [3, 7, 18–20]. При определенных условиях ОПР формирует плазменную струю [21] (расчеты) и УВ с управляемой структурой [22] (расчеты, предварительный эксперимент).

Цель эксперимента состояла в исследовании влияния амплитудной модуляции лазерного излучения на структуру и спектр периодических УВ, а также УВ, объединенных в цуги или пакеты цугов. Исследовалось также управление спектром в процессе горения ОПР и определялась эффективность преобразования лазерного излучения в УВ. При высокой частоте повторения импульсов внутри цугов f периодические УВ взаимодействуют между собой, их спектр качественно отличается от спектра волн с низкой частотой повторения, когда длительность импульса много меньше $1/f$. Периодические цуги лазерных импульсов преобразуются в УВ, в спектре которых присутствуют ультразвуковые и низкие частоты $F_0 \ll f$ (здесь F_0 – частота повторения цугов). Звук на частоте F_0 вызывал сильные слуховые ощущения, фиксировался видеокамерой, регистрировался спектрометром и был выявлен в спектре при математической обработке измеренных сигналов давления в УВ. Похожие явления на-

блюдались ранее при модуляции ультразвукового пучка. В работе [23] ультразвуковой пучок вызывал слуховые ощущения на частоте его модуляции. Одновременное присутствие в спектре ультразвуковых и низкочастотных компонент имело место при использовании параметрического излучателя – ультразвукового пучка, модулированного по амплитуде с частотой $F_0 \ll f$ и излучающего на частоте F_0 . При этом эффективность преобразования ультразвукового пучка в низкочастотную акустическую волну очень мала ($\sim (F_0/f)^2 \sim 10^{-4} - 10^{-3}$, см. обзор [24]).

2. Эксперимент

ОПР в газе создавался с использованием CO_2 -лазера [25], генерировавшего импульсно-периодическое излучение со следующими параметрами: средняя мощность $\sim 0.7 - 1.5$ кВт, длительность импульсов ~ 1 мкс, частота повторения $f \sim 7 - 117$ кГц. Оптический резонатор лазера позволял формировать как импульсно-периодическое излучение, так и излучение в виде периодических цугов лазерных импульсов при отсутствии излучения между цугами. В цугах содержалось заданное число импульсов ($N \sim 10 - 30$), следовавших с частотой f .

ОПР формировался в фокусе линзы на оси истекавшей в атмосферный воздух струи аргона, необходимой для устойчивого горения ОПР. Энергия лазерных импульсов была мала и составляла 0.02–0.1 Дж (зависит от f), но достаточна для оптического пробоя Ag в условиях ОПР. Оси излучения и струи были совмещены. Каждый импульс излучения создавал лазерную искру, которая на начальной стадии имела длину $L \sim 3 - 5$ мм, радиус $\sim 0.3 - 0.5$ мм и давление десятки атмосфер. В ОПР поглощалось $\sim 75\%$ лазерного излучения.

При тепловом расширении лазерных искр формировались УВ, выходящие за пределы струи в неподвижный воздух, унося $\sim 10 - 25\%$ мощности лазерного излучения, поглощаемого в ОПР. На расстоянии от ОПР, равном ~ 3 см, форма УВ близка к сферической. Давление $p(t)$ в УВ измерялось пьезодатчиком, который переме-

*Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: tischenko@plasma.nsk.ru

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

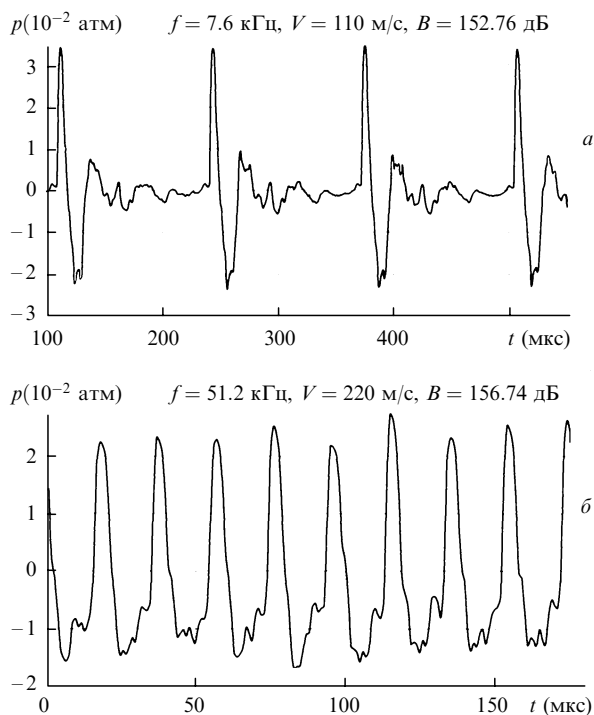


Рис.1. Изменение во времени давления в УВ на расстоянии $R = 5$ см от ОПР с частотой повторения f , горящего в струе аргона диаметром 6 мм, которая истекает в воздух со скоростью V , при средней мощности поглощавшегося лазерного излучения $W = 535$ (а) и 1290 Вт (б) и средней мощности УВ, излучаемых ОПР, $W_a = 58$ (а) и 147 Вт (б); B – интегральная по спектру интенсивность волн.

щался вдоль линии, перпендикулярной оси струи и пересекавшей ее вблизи фокуса пучка. Давление в УВ на расстоянии 140 см от ОПР измерялось микрофоном, который, так же как и датчик, имел полосу линейности не менее 100 кГц.

От датчика или микрофона сигнал поступал в систему регистрации данных, где 4096 значений с дискретностью 1 мкс запоминались в компьютере (первой точке присваивалось время $t = 0$). Указанного числа точек было достаточно для запоминания нескольких цугов УВ (при $F_0 \sim 1$ кГц). Спектр $p(t)$, полученный с использованием преобразования Фурье, имел дискретность ~ 244 Гц. Для получения более детального спектра, как показал эксперимент, выборка должна содержать более 2×10^4 данных с дискретностью ~ 0.5 мкс. При низкой частоте повторения цугов спектр волн измерялся спектрометром. Средняя мощность, уносимая УВ, определялась по измеренной средней интенсивности волн в предположении их сферической симметрии. Видеокамера записывала звук и свечение плазмы ОПР с расстояния ~ 30 см от ОПР.

В опытах изменялись следующие параметры: частота повторения лазерных импульсов, диаметр (3–6 мм) и скорость V (100–400 м/с) струи, длительность цугов (0.0001–0.03 с), частота их повторения (0.036–10 кГц), положение пьезодатчика относительно ОПР ($R = 5$ –40 см). Исследовались два режима горения ОПР: импульсно-периодический и генерации цугов. В первом случае ОПР создавал «бесшумные» УВ, т. к. спектр волн находился в области частот более 10 кГц, где слуховой аппарат человека имеет низкую чувствительность. В режиме цугов возникали сильные слуховые ощущения. Влияние отраженных волн и фонового акустического поля на результаты измерений было мало, т. к. в зоне

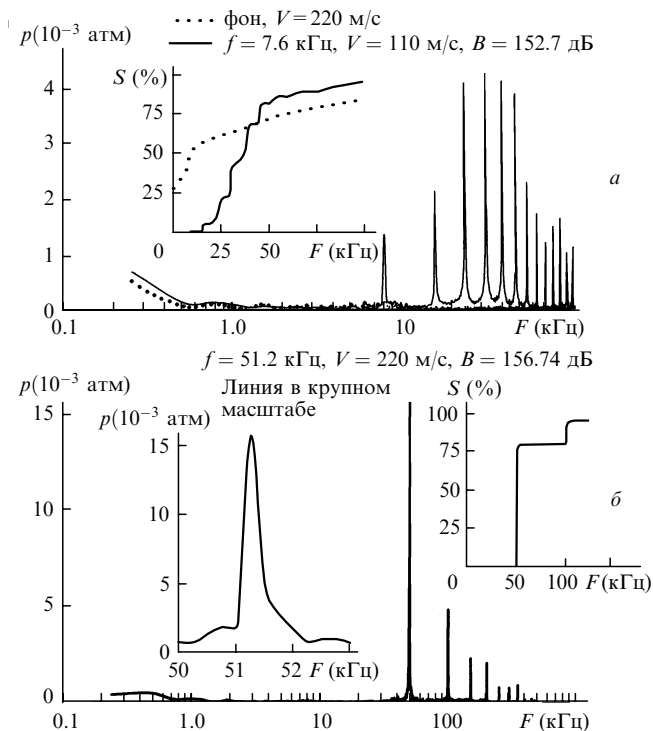


Рис.2. Спектр УВ, представленных на рис.1 (сплошные кривые), и спектр фона (пунктир), создававшегося струей и лазерной установкой при $R = 5$ см. На вставках приведены зависимости $S(F)$ для УВ (сплошные кривые) и фона (пунктир), а также контур наиболее сильной линии.

измерений интенсивность волн превышала фон на 40–60 дБ; близкорасположенные к ОПР отражающие поверхности были покрыты материалом, поглощающим звук.

3. Результаты эксперимента

3.1. Периодические УВ

На рис.1 и 2 показано давление в УВ и их спектр, которые соответствуют как низкой частоте повторения лазерных импульсов (УВ между собой не взаимодействуют, т. к. время паузы между ними $\sim 1/f$ существенно больше продолжительности фазы сжатия t_+ и фазы низкого давления t_- УВ), так и высокой частоте повторения ($1/f < t_+ + t_-$). Низкочастотная компонента спектра $F < 1$ кГц формировалась струей аргона. Спектры измеренных сигналов $p(t)$ получены с использованием преобразования Фурье. Центр первой линии в спектре совпадает с частотой повторения лазерных импульсов, а значит и УВ. При малой частоте f повторения лазерных искр спектр сигнала, как видно из рис.2,а, содержит линию на частоте повторения импульсов лазерного излучения $F \approx f$ и более высокие гармоники.

На рис.2 показана зависимость от F отношения S мощности УВ в области спектра от нуля до F к полной мощности волн. При $f = 7.6$ кГц основная часть мощности волн излучается в области высоких частот и лишь $\sim 3\%$ соответствуют области $F < 10$ кГц, поэтому при горении ОПР был слышен звук слабой интенсивности. По мере увеличения f число интенсивных гармоник в спектре уменьшалось. На рис.1,б и 2,б показано давление в волнах $p(t)$ и их спектр при $f = 51.2$ кГц. При высокой частоте повторения лазерных импульсов, а значит

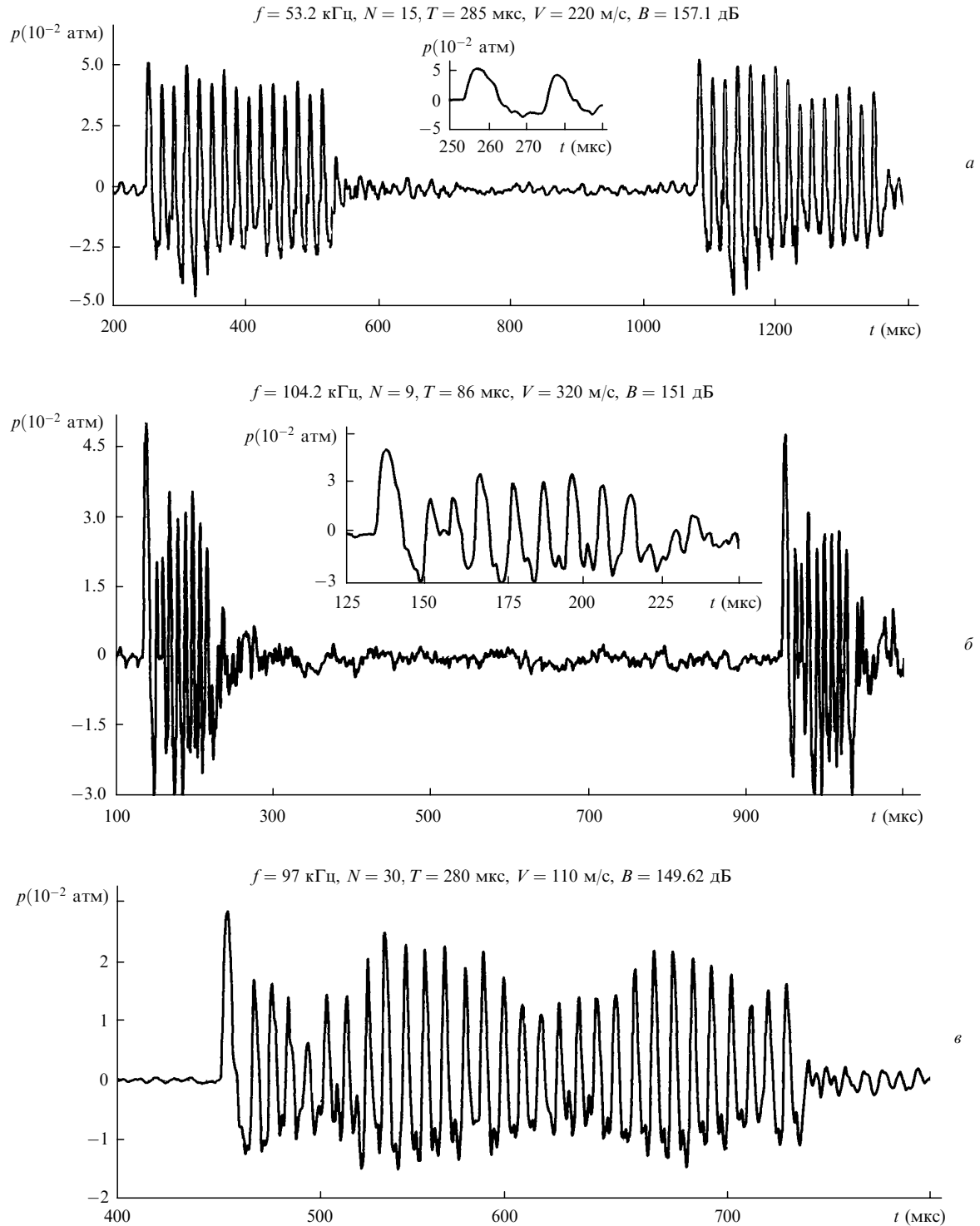


Рис.3. Давление в УВ, создаваемых пучками лазерных импульсов при $R = 5$ см, $F_0 = 1.2$ кГц, $W = 677$ (а), 363 (б) и 536 Вт (в), $W_a = 161$ (а), 39.2 (б) и 28.6 Вт (в) ($T \sim N/f$ – длительность пучков).

и УВ, происходит взаимодействие волн [22], в результате чего профиль давления волны оказывается сильно искаженным по сравнению с профилем УВ точечного взрыва. В узком спектральном диапазоне вблизи первой гармоники $F = f$ содержится основная часть мощности волн $S_1 \sim 80\%$. При дальнейшем увеличении f значение S_1 приближалось к единице.

На рис.2,б в крупном масштабе представлен контур наиболее сильной линии. Здесь, как и в других опытах, характерная ширина линии $\Delta F \sim 400$ Гц. Это значение, видимо, завышено, т. к. дискретность спектра (~ 244 Гц)

сравнима с ΔF . Из измерений, выполненных пьезодатчиком, следует, что при увеличении расстояния от ОПР давление в УВ уменьшается, а их средняя мощность, форма и спектр практически не меняются. На расстоянии от ОПР 1.4 м микрофон регистрировал гармонический сигнал вида $p(t) \sim \sin(2\pi ft)$, спектр которого содержал одну линию с $F = f \sim 51.2$ кГц, мощность волн была в ~ 8 раз меньше, чем полученная с использованием пьезодатчика. Погрешность измерений, видимо, вносила сетка, закрывавшая чувствительный элемент микрофона (и вызывавшая отражение УВ).

3.2. Цуги ударных волн

На рис.3 показаны цуги УВ, создававшиеся с использованием периодических цугов лазерных импульсов. Рис. 3 и 4 иллюстрируют влияние частоты повторения f и числа лазерных импульсов N в цуге на форму УВ и их спектр. При горении ОПР цуги $p(t)$ с хорошей точностью повторяются, в пределах же цуга, особенно при больших $f \sim 100$ кГц, различие в форме УВ может быть существенным, что связано с неравномерностью условий форми-

рования лазерных искр в струе газа. Повторяемость цугов лучше при больших энергиях лазерного излучения в импульсе, а также в случае, когда за время паузы между импульсами плазма искр успевает сноситься струей вниз по потоку.

Во время паузы между цугами пьезодатчик регистрирует пульсации давления, создаваемые струей с распадающейся в ней лазерной плазмой. На рис.4 представлены спектры сигналов давления, полученные с использованием преобразования Фурье. Наибольшее отличие

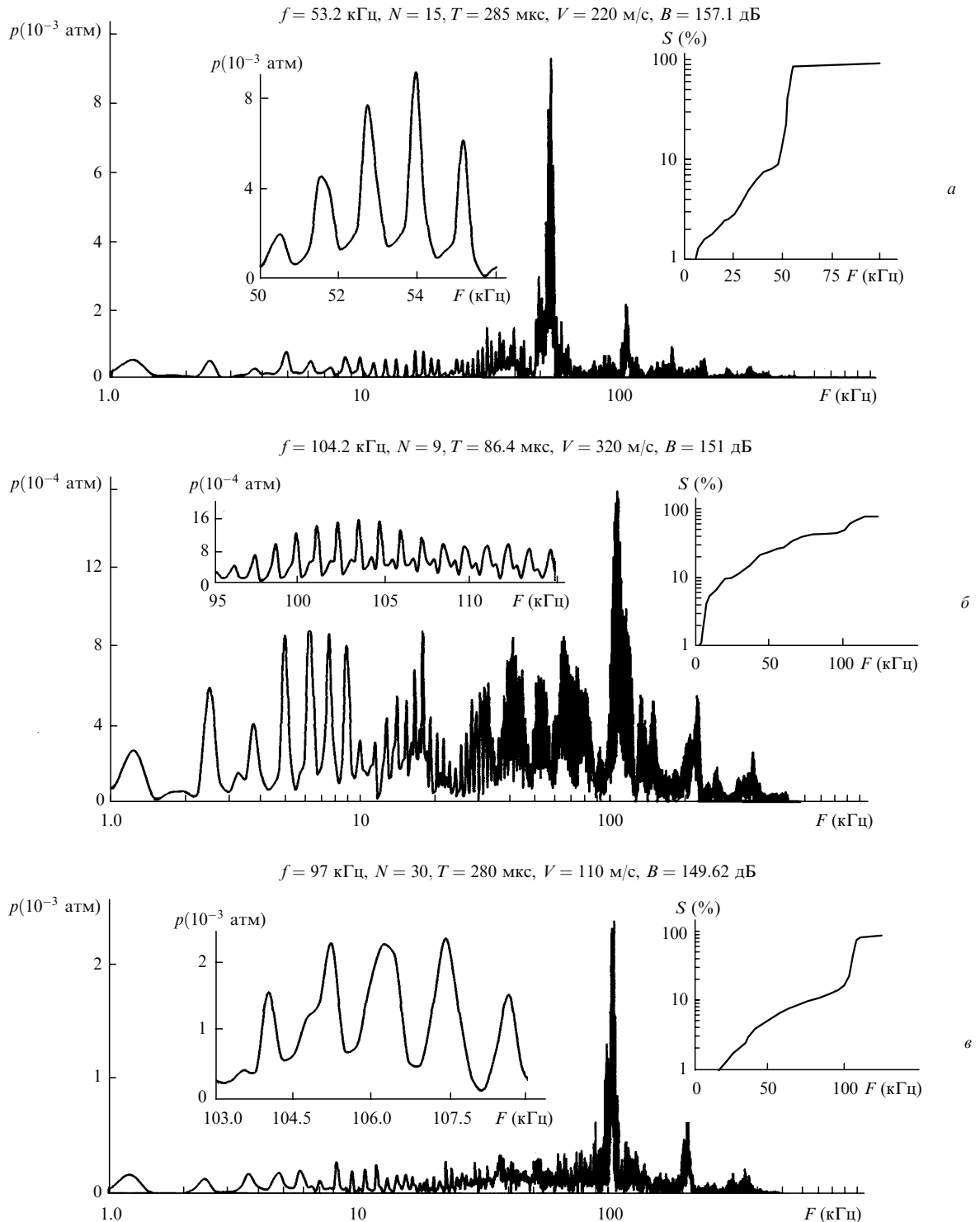


Рис.4. Спектр УВ, представленных на рис.3, а также зависимости $S(F)$. В крупном масштабе показаны фрагменты спектра вблизи частоты повторения лазерных импульсов в цугах.

от режима генерации периодических волн состоит в следующем: в спектре появляется низкочастотная компонента, на частоте $F \approx f$ вместо одной линии формируется группа близкорасположенных узких линий, создается низкочастотный звук на частоте $F_0 \ll f$ и на более высоких гармониках. Фон с интенсивностью $B \approx 80$ дБ (суммарной по всему спектру) воспринимался как слабый звук по сравнению со звуком, создаваемым ОПР (см. ниже рис.5).

Звуковые эффекты наблюдались как вблизи ОПР, где на микрофон видеокамеры или на слуховой аппарат человека действуют УВ, так и на большом расстоянии, где влияние отраженных сигналов существенно. С использованием пьезодатчика измерялось давление на расстоянии $R = 5 - 40$ см от ОПР. С удалением от источника наблюдалось уменьшение амплитуды сигналов, тогда как их форма (цуги УВ) и спектр изменялись незначительно. На большом расстоянии, как следует из измерений, выполненных с помощью микрофона ($R = 140$ см), паузы между цугами были заполнены волнами, структура волн и цугов сильно сглажена. Спектр же оставался качественно прежним: основная часть мощности волн сосредоточена в ультразвуковых волнах на частоте $F \sim f$, присутствует также и низкочастотная компонента.

С целью изучения возможности управления спектром волн в широком диапазоне частот выполнен эксперимент, в котором звук получен на низкой частоте 36 Гц или одновременно на двух частотах 36 и 1200 Гц. На рис.5 показаны спектры, зарегистрированные спектрометром, измерявшим среднюю интенсивность в октавных диапазонах частот. На рис.5,а представлен спектр фона, который создавался работающим лазером и вместе с ним струей и модулятором лазерного излучения (в отсутствие УВ микрофон не вносил погрешности в измерения).

На рис.5,б показаны спектры волн, создаваемых ОПР при некоторых частотах повторения цугов F_0 и УВ внутри цугов f . Звук на частоте $F \approx 36$ Гц (кривая 5) создавался ОПР, генерировавшим цуги УВ с частотой повторения $F_0 = 36$ Гц. Длительности цугов и паузы между ними были равны $0.5/F_0 \approx 0.027$ с. Низкочастотный звук на двух частотах одновременно (кривые 3 и 4) создавался с использованием тройной модуляции лазерного излучения. Лазер с частотой повторения $F_0 = 36$ Гц генерировал пакеты, в каждом из которых содержалось по ~ 30 цугов, между пакетами излучение отсутствовало в течение времени $\sim 0.5/F_0$. В пределах каждого пакета цуги следовали с частотой повторения $F_0 = 1.2$ кГц, внутри цугов лазерные импульсы следовали с частотой $f \approx 52$ кГц (кривая 3) или 25 кГц (кривая 4). Из рис.5,б видно, что в спектре имеются максимумы интенсивности, положение которых в ультразвуковой области соответствует частоте повторения лазерных импульсов в цуге, а в области низких частот – частоте повторения цугов $F_0 = 1.2$ кГц и частоте повторения пакетов цугов $F_1 = 0.036$ кГц. Здесь основная часть мощности волн излучается на частоте повторения лазерных импульсов.

Результаты измерений, в том числе не вошедшие в статью, свидетельствуют о том, что в условиях эксперимента отсутствовала генерация УВ или низкочастотного звука (выделенного из фона), не связанная с действием ОПР, либо генерация низкочастотного звука в результате интерференции отраженных от стенок волн или вибрации элементов стенда. Это подтверждается следующими данными: частота повторения УВ совпадала с частотой

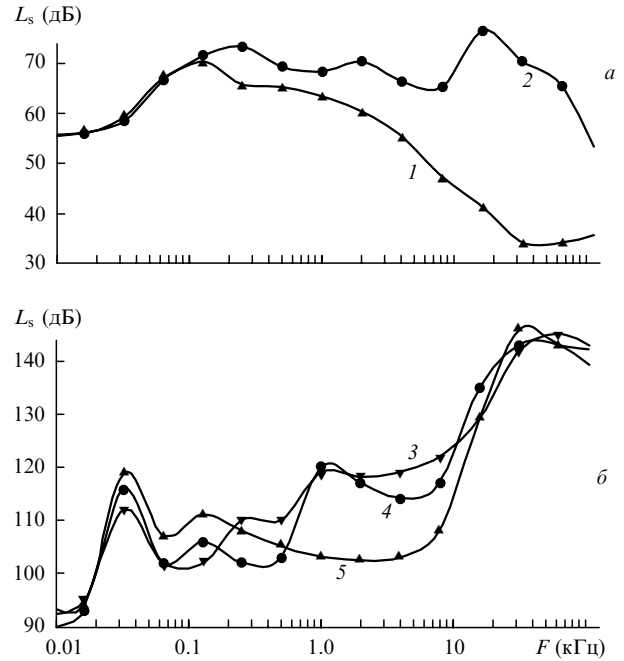


Рис.5. Спектры фона (а) и ОПР и фона (б):

1 – фон создавался лазером, измерения выполнены с использованием микрофона, находившегося на расстоянии $R = 140$ см от ОПР, интегральная по спектру интенсивность $B = 73$ дБ; 2 – фон создавался лазером, струей ($V = 110$ м/с) и модулятором лазерного излучения при $B = 81$ дБ, данные получены с использованием пьезодатчика ($R = 5$ см); 3 – частота повторения импульсов $f = 52$ кГц, частоты повторения цугов и пакетов цугов $F_0 = 1.2$ и $F_1 = 0.036$ кГц, $W = 440$ Вт; 4 – $f = 25$ кГц, $F_0 = 1.2$, $F_1 = 0.036$ кГц, $W = 285$ Вт, $B = 147$ дБ; 5 – $f = 25$ кГц, $F_0 = 1.2$ кГц, $F_1 = 0.036$ кГц, $W = 675$ Вт, $B = 149$ дБ.

повторения лазерных импульсов; при удалении от ОПР интенсивность УВ уменьшалась; при снижении мощности лазерного излучения интенсивность низкочастотного звука и средняя мощность волн уменьшались; давление в цугах волн было много больше, чем в паузе между цугами; при плавном увеличении частоты повторения цугов ($F_0 \approx 0.3 - 15$ кГц) тональность низкочастотного звука повышалась, причем при $F_0 > 10$ кГц звук вызывал слабые слуховые ощущения. Далее частота F_0 изменялась в обратном порядке: уменьшалась от 15 до 0.3 кГц, при этом появлялся интенсивный звук, его частота понижалась по мере уменьшения F_0 . Аналогичный опыт проведен с изменением F_0 от ~ 30 до 150 Гц. На экспериментальном стенде отсутствовали элементы, возбуждение колебаний которых могло бы создать низкочастотный звук, перестраиваемый в столь широком диапазоне частот с интенсивностью, много больше фоновой.

Таким образом, ОПР преобразует лазерное излучение в сферические УВ – периодические волны или волны, объединенные в цуги. Спектр периодических волн содержит несколько интенсивных линий в ультразвуковой области частот («бесшумные» УВ). В спектре цугов УВ присутствуют линии на частоте повторения лазерных импульсов и на низкой частоте повторения цугов, а также их гармоники. При этом возникает сильный низкочастотный звук. В обоих случаях основная доля мощности волн в спектре сосредоточена вблизи частоты повторения лазерных импульсов. В процессе горения разряда оперативное управление спектром волн в широком диапазоне частот можно осуществлять посредством изменения частот модуляции лазерного излучения и

(или) его мощности. Эффективность преобразования лазерного излучения в УВ достигала $\sim 25\%$, а максимальная средняя мощность волн составляла ~ 160 Вт.

Авторы выражают благодарность А.Г.Пономаренко за поддержку исследований и обсуждение их результатов, а также С.В.Панову за помощь в обработке экспериментальных данных. Работа поддержана РФФИ (грант № 00-02-17482).

1. Бункин Ф.В., Комиссаров В.М. *Акустич. жс.*, **19**, 305 (1973).
2. Райзер Ю.П. *Лазерная искра и распространение разрядов* (М.: Наука, 1974, с.169).
3. Mugafo L.N., Raizer Yu.P. *AIAA Paper*, № 94-2451 (1994).
4. Островская Г.В., Зайдель А.Н. *УФН*, **111**, 579 (1973).
5. Маркелова Л.П., Немчинов И.В., Шубадеева Л.П. *ЖПМТФ*, № 2, 54 (1973).
6. Коробейников В.П. *Задачи теории точечного взрыва* (М.: Наука, 1974, с.130).
7. Борзов В.Ю., Михайлов В.М., Рыбка И.В., Савищенко Н.П., Юрьев А.С. *ИФЖ*, **66**, 515 (1994).
8. Анисимов В.Н., Воробьев В.А., Гришина В.Г., Деркач О.Н., Каневский М.Ф., Себрант А.Ю., Степанова М.А., Чернов С.Ю. *Квантовая электроника*, **22**, 862 (1995).
9. Божков А.И., Бункин Ф.В., Савранский В.В. *Письма в ЖТФ*, **1**, 435 (1975).
10. Божков А.И., Бункин Ф.В. *Квантовая электроника*, **2**, 1763 (1975).
11. Бункин Ф.В., Михалевич В.Г., Шипуло Г.П. *Квантовая электроника*, **3**, 441 (1976).
12. Козев Е.Ф., Наугольных К.А. *Акустич. жс.*, **22**, 366 (1977).
13. Касоев С.Г., Лямшев Л.М. *Акустич. жс.*, **23**, 608 (1977).
14. Лямшев М.Л., Михалевич В.Г., Шипуло Г.П. *Акустич. жс.*, **25**, 146 (1979).
15. Лямшев М.Л., Михалевич В.Г., Шипуло Г.П. *Акустич. жс.*, **26**, 230 (1980).
16. Лямшев Л.М. *УФН*, **135**, 637 (1981).
17. Третьяков П.К., Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. *ДАН*, **336**, 466 (1994).
18. 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).
19. Гувернюк С.В., Самойлов А.Б. *Письма в ЖТФ*, **23**, № 9, 1 (1997).
20. Левин В.А., Афонина Н.Е., Георгиевский П.Ю., Громов В.Г., Терентьева Л.В. *Препринт Института механики МГУ № 36* (М., 1998).
21. Тищенко В.Н., Гулидов А.И. *Письма в ЖТФ*, **26**, № 19, 77 (2000).
22. Тищенко В.Н., Грачев Г.Н., Гулидов А.И., Запругаев В.И., Посух В.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 283 (2001).
23. Гаврилов Л.Р., Пудов В.И., Розенблюм А.С., Цирульников Е.М., Чепкунов А.В., Щеканов Е.Е. *Акустич. жс.*, **23**, 557 (1977).
24. Наугольных К.А., Островский Л.А., Сутин А.М. В кн.: «*Нелинейные волны. Распространение и взаимодействие*» (М.: Наука, 1981, с.166).
25. Grachev G.N., Ponomarenko A.G., Smirnov A.L., Shulyat'ev V.B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4165**, 185 (2000).