

# Стационарная сила, создаваемая оптическим пульсирующим разрядом в модели лазерного двигателя

Г.Н.Грачев, В.Н.Тищенко, В.В.Аполлонов, А.И.Гулидов,  
А.Л.Смирнов, А.В.Соболев, М.И.Зимин

*Исследован оптический пульсирующий разряд, создаваемый импульсно-периодическим лазерным излучением (частота следования импульсов до 100 кГц), в моделирующей рефлектор лазерного двигателя цилиндрической трубке. Измерено давление ударных волн и создаваемая ими сила тяги. Разряд формировал стационарную силу тяги  $\sim 1$  Н/кВт.*

**Ключевые слова:** оптический пульсирующий разряд, лазерный двигатель, ударные волны, сила тяги.

## 1. Введение

Начиная с 1970-х годов и до настоящего времени возможность применения лазерного двигателя для вывода на орбиту легких спутников продолжает интересовать исследователей [1–9]. По-прежнему актуально решение проблем, на которые было указано в [3]. Это повышение эффективности – коэффициента связи  $J_T$  использования лазерного излучения (отношение силы тяги к мощности излучения) в несколько раз, а также предотвращение ударного разрушения аппарата, которое возникает при использовании импульсно-периодического (ИП) лазерного излучения с малой частотой  $f$  следования и большой энергией  $Q$ . Так, например, при  $J_T \sim 0.3$  кН/МВт (это значение типично для воздушно-реактивного лазерного двигателя), массе 200 кг и ускорении 10g необходимая мощность лазера должна составлять  $\sim 60$  МВт ( $Q \sim 100$  г в тротиловом эквиваленте,  $f \sim 100$  Гц), а мощность источника питания лазера должна быть равна 0.5–1 ГВт. Однако такой лазер вряд ли появится в обозримом будущем. В наших экспериментах  $J_T \sim 1$  кН/МВт (получено экспериментально) и 3–5 кН/МВт (оценка, особые условия), что позволяет в 3–10 раз снизить мощность лазера. Мощность 10–15 МВт вполне реально получить уже сегодня с помощью газодинамических лазеров с использованием особенностей генерации ИП излучения с большой частотой следования импульсов и методов масштабирования генерации по мощности [10, 11].

Для решения отмеченных выше трудностей в [12–14] предложено использовать ИП излучение с  $f \sim 100$  кГц, оптический пульсирующий разряд (ОПР) и эффект объединения ударных волн (УВ), создаваемых ОПР. Критерии объединения подтверждены в эксперименте [15].

**В.В.Аполлонов.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: varpollo@kapella.gpi.ru

**Г.Н.Грачев, В.Н.Тищенко, А.Л.Смирнов, М.И.Зимин.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13/3; e-mail: grachev@laser.nsc.ru

**А.И.Гулидов, А.В.Соболев.** Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская 4/1; e-mail: gai@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 17 ноября 2006 г., после доработки – 12 марта 2007 г.

ОПР – это лазерные искры в фокусе ИП излучения, которые могут быть неподвижными или перемещаться с большой скоростью [16–20]. Высокочастотный ИП режим оптимален для мощных лазеров с непрерывной накачкой и модуляцией добротности резонатора. При этом энергия импульсов сравнительно мала и возможна стационарная тяга.

Цель работы – экспериментальная проверка применимости лазерного излучения с большой частотой следования импульсов для создания стационарной тяги в лазерном двигателе.

## 2. Эксперимент

В модели, рассмотренной в [12–14], возможны импульсный и стационарный режимы, особенности которых поясним с помощью рис.1. ОПР создается в фокусе линзы на оси струи газа, истекающего из камеры высокого давления или воздухозаборника в цилиндрический рефлектор. Генерируемые ОПР ударные волны, объединяясь, формируют квазистационарную волну (КВ) – область высокого давления между ОПР и рефлектором. В результате возникает сила тяги  $F_T$ . В цилиндрическом рефлекторе коэффициент связи максимален,  $J_T = 1.1$  Н/кВт [13], как при плоском взрыве [21]. В импульсном режиме

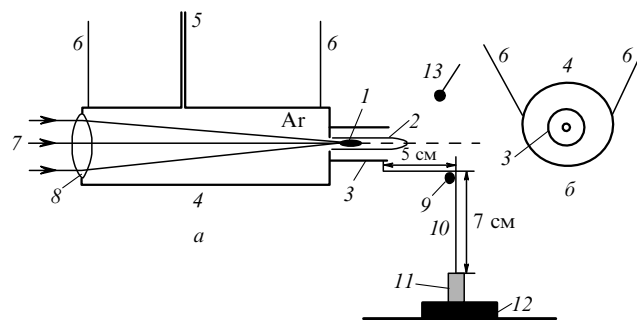


Рис.1. Схема эксперимента, вид сбоку (а) и спереди (б):

1 – ОПР; 2 – струя аргона; 3 – сменная цилиндрическая насадка (рефлектор); 4 – камера высокого давления (модель ракеты); 5 – гибкий шланг для подачи аргона; 6 – проволоочки подвеса модели; 7 – лазерное излучение; 8 – фокусирующая линза; 9 – блок; 10 – проволочка, связывающая цилиндр 3 с грузом 11; 12 – вес; 13 – датчик давления УВ.

ОПР создается между цугами лазерных импульсов. Узкая струя, диаметр которой  $D_j \sim 0.3R_d$  [13] мал по сравнению с диаметром рефлектора  $D_r$ , выносит плазму из зоны горения ОПР, что необходимо для эффективного формирования УВ. Здесь  $R_d = 2.15(q/P_0)^{1/3}$  – динамический радиус искры,  $q$  (Дж) – поглощаемая в искре энергия лазерных импульсов,  $P_0$  (атм) – давление газа. Сила тяги действует в течение цуга импульсов, длительность которого ограничена временем нагрева воздуха. Смена горячего атмосферного воздуха холодным происходит в течение паузы между импульсами. В стационарном режиме газ непрерывно поступает в рефлектор со стороны дна, формируя поток ко всему сечению. В опытах этому режиму соответствует  $D_j \sim 2R_d \sim 3$  мм, что сравнимо с диаметром рефлектора  $D_r \sim 5$  мм.

Схема эксперимента показана на рис.1. ОПР создавался излучением  $\text{CO}_2$ -лазера. Длительность импульсов составляла  $\sim 1$  мкс, переднего пика – около 0.2 мкс. Частота следования импульсов варьировалась от 7 до 100 кГц, энергия импульсов была равна 0.1 – 0.025 Дж. При этом пиковая мощность составляла 300 – 100 кВт, средняя мощность ИП излучения  $W = 600 - 1700$  Вт, а поглощаемая мощность  $W_a = \eta W$  ( $\eta \approx 0.7$ ). Форма падающего и прошедшего через область ОПР импульсов показана на рис.2. Отметим, что при малой длительности импульса и большой мощности  $\eta \sim 0.95$ . Поскольку интенсивность излучения в фокусе ниже порога оптического пробоя воздуха, использовалась струя аргона, длина искр  $l$  вдоль потока была равна  $\sim 0.5$  см.

Модель ракеты с лазерным двигателем представляла собой дюралюминиевый цилиндр диаметром  $\sim 8$  см, длиной  $\sim 26$  см и весом 1.1 кг, подвешенный на четырех тонких проволочках длиной 1.1 м и способный перемещаться только в осевом направлении. На торце камеры был закреплен рефлектор – сменная цилиндрическая насадка. Лазерное излучение вводилось в камеру через линзу с фокусным расстоянием 17 см. Струя аргона формировалась при истечении из камеры высокого давления через отверстие диаметром  $\sim 3$  или 4 мм. Скорость струи  $V$  регулировалась давлением аргона, который подавался в камеру по гибкому шлангу. Создаваемое струей и УВ усилие передавалось с помощью тонкой (диаметром  $\sim 0.2$  мм) молибденовой проволочки на груз, стоящий на тензочувствительных весах (погрешность 0.1 г). Длина проволочки составляла 12 см, диаметр блока – 1 см.

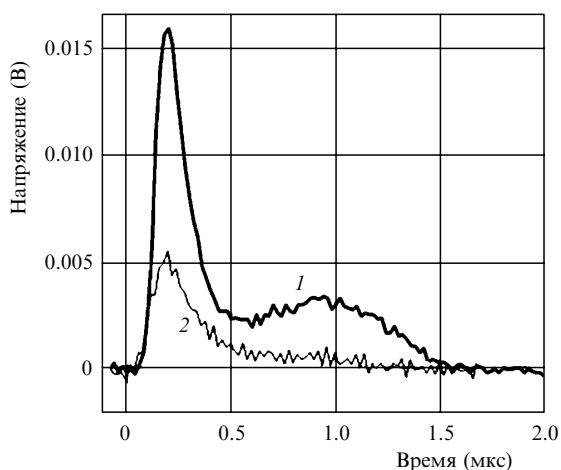


Рис.2. Оциллограммы лазерного импульса (1) и импульса излучения, прошедшего через ОПР (2) при  $f = 50$  кГц.

Последовательность действий в каждом опыте была следующей. Закрепленный на проволочке груз устанавливался на весы. При этом модель слегка отклонялась от положения равновесия (в сторону блока), что необходимо для создания начального натяжения проволочки ( $\sim 1$  г). Показание весов ( $F_m$ ) фиксировалось, затем включалась струя, и показание весов уменьшалось до  $F_1$ . Это объясняется тем, что при большой скорости струя создает пониженное давление (эжекционный эффект) в рефлекторе. После включения ОПР показание весов составило  $F_2$ . Сила тяги  $F_r$ , создаваемая ОПР, равна  $F_1 - F_2$ . Давление УВ измерялось датчиком, сигнал которого запоминался в компьютере с дискретностью  $\sim 1$  мкс. Полюса линейности датчика составляла  $\sim 100$  кГц. Датчик располагался на расстоянии  $\sim 5$  см от оси струи (см. рис.1) и включался после зажигания ОПР ( $t = 0$ ). Время регистрации давления было равно 100 мс.

Оценим возможность объединения УВ в эксперименте и ожидаемые значения  $F_r$  и  $J_r$ . Эффективность объединения зависит от параметров  $\omega = fR_d/C_0$  и  $M_0 = V/C_0$  ( $M_0 < 1$ ), где  $C_0$  – скорость звука в газе. Если расстояние от области ОПР до стенок много больше  $R_d$ , а искры сферические или их длина  $l$  меньше  $R_d$ , то частоты, характеризующие взаимодействие ОПР с газом, таковы [12]:

$$\omega_0 \approx 2.5M_0, \quad (1)$$

$$\omega_1 \approx 0.8(1 - M_0), \quad (2)$$

$$\omega_2 \approx 5.9(1 - M_0)^{1.5}. \quad (3)$$

При  $\omega < \omega_1$  УВ не взаимодействуют между собой. В диапазоне  $\omega_1 < \omega < \omega_2$  фазы сжатия соседних волн начинают объединяться, причем эффект усиливается по мере приближения значения  $\omega$  к  $\omega_2$ . В области  $\omega > \omega_2$  УВ формируют квазистационарную волну, длина которой много больше длины фазы сжатия УВ. При  $\omega < \omega_0$  ОПР эффективно (до  $\sim 30\%$ ) преобразует ИП излучения в УВ.

В импульсном режиме значение  $M_0$  в (1) соответствует скорости струи. УВ объединяются в неподвижном газе, поэтому в (2) и (3)  $M_0 \approx 0$ . Частотам  $f = 7 - 100$  кГц соответствуют  $R_d = 0.88 - 0.55$  см и  $\omega = 0.2 - 1.7$ . Следовательно, в данном случае УВ не объединяются. В цугах, где энергия первых импульсов в 1.5 – 2 раза больше, чем в последующих ( $\omega \approx 2$ ), могут объединяться первые УВ. Создаваемая цугами сила тяги  $F_r = J_r \eta W = 0.3$  Н ( $\sim 30$  г), где  $J_r = 1.1$  Н/кВт,  $\eta = 0.6$ ,  $W \sim 0.5$  кВт.

В стационарном режиме при  $M_0 \sim 0.7$  УВ объединяются, т. е.  $\omega > \omega_2$  ( $\omega = 1.8$ ,  $\omega_2 \approx 1.3$ ). Между ОПР и дном цилиндра формируется квазистационарная волна. Избыточное давление на дно  $\delta P = P - P_0 = 0.54P_0(R_d/r)^{1.64} \approx 0.25 - 0.5$  атм, а сила тяги  $F_r \approx \pi(D_r^2 - D_j^2)\delta P/4 = 0.03 - 0.06$  кг.

### 3. Результаты измерений

#### 3.1. Контрольные измерения

Силы тяги струи  $F_j$  и  $F_r$ , а также избыточного давления пульсаций  $\delta P = P - P_0$  измерялись для модели без рефлектора. Рассмотрены два случая: струя без ОПР и ОПР горит в струе. Скорость струи  $V$  и параметры излучения варьировались. Для  $V = 50, 100$  и  $300$  м/с создаваемая струей сила  $F_j = 6, 28$  и  $200$  г, а амплитуда пуль-

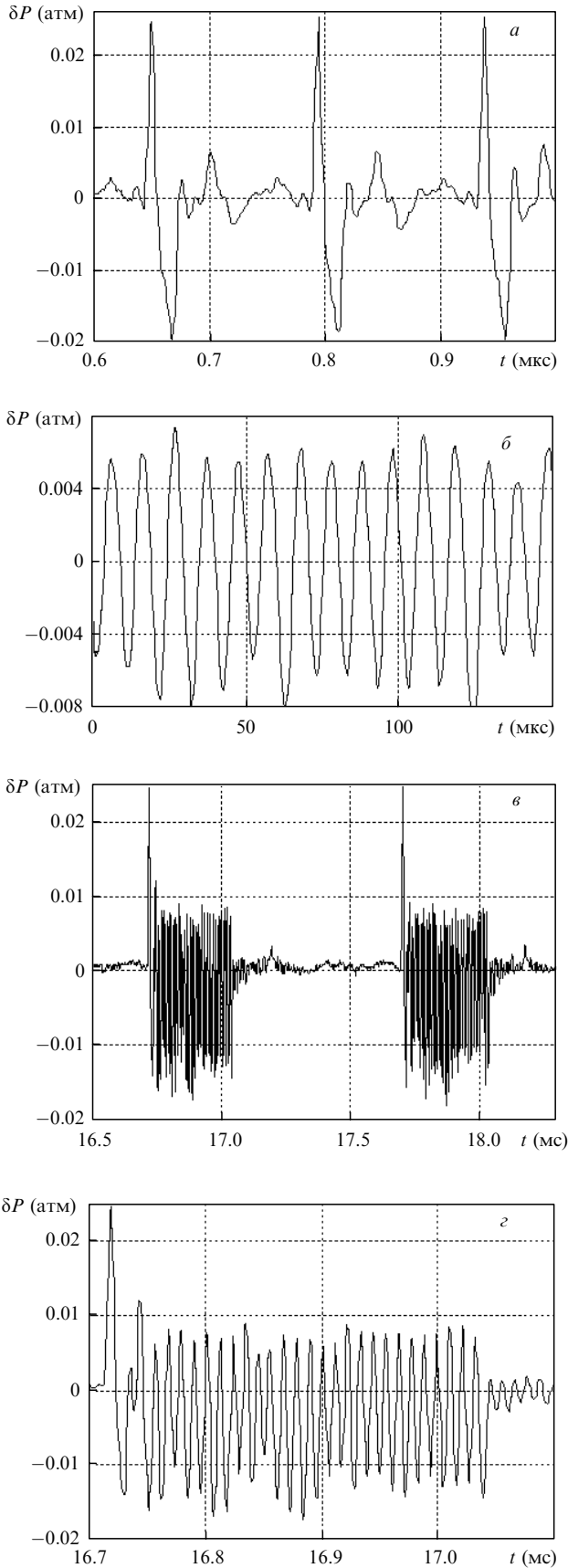


Рис.3. Пульсации давления, создаваемые ОПР при  $V = 300$  м/с (рефлектор снят), в случае  $f = 7$  кГц,  $W = 690$  Вт (а);  $f = 100$  кГц,  $W = 1700$  Вт (б) и  $f = 100$  кГц, частота следования цугов  $\varphi = 1$  кГц,  $W = 1000$  Вт, число импульсов в цуге  $N = 30$ ; в – цуг ударных волн в крупном масштабе, параметры те же, что и для рис.3.а.

саций  $\delta P = 5 \times 10^{-6}$ ,  $2 \times 10^{-5}$  и  $3 \times 10^{-4}$  атм. Горение ОПР в струе не приводило к изменению показания весов. Это связано с тем, что ОПР расположен на расстоянии  $r$  от дна камеры высокого давления, таком, что  $r/R_d > 2$ , когда импульс от воздействия УВ мал [3, 22]. Как видно из рис.3, создаваемые ОПР пульсации  $\delta P(t)$  много больше флуктуаций давления в струе.

### 3.2. Стационарный режим

ОПР горел в потоке, который формировался при истечении газа из камеры через отверстие ( $D_j = 0.3$  см) в рефлектор ( $D_r = 0.5$  см) (рис.4). Поскольку избыточное давление на дно рефлектора составляло  $\sim 0.5$  атм (см. выше), то для предотвращения запыряния струи давление, используемое в камере, было выбрано равным  $\sim 2$  атм. Без ОПР скорость струи  $V = 300$  и  $400$  м/с,  $F_j = 80$  и  $140$  г. ОПР создавался ИП излучением с  $f = 50$  и  $100$  кГц и

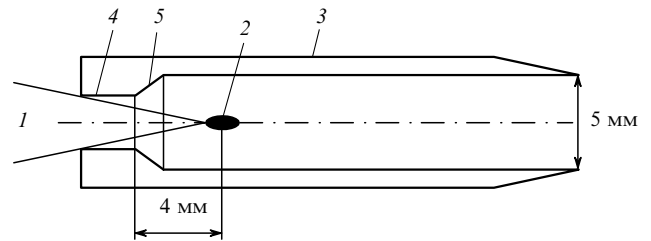


Рис.4. Рефлектор стационарного лазерного двигателя: 1 – ИП лазерное излучение с  $f = 50$  и  $100$  кГц,  $W = 1200$  Вт; 2 – ОПР; 3 – рефлектор; 4 – отверстие диаметром  $\sim 3$  мм, через которое аргон истекает из камеры высокого давления ( $\sim 2$  атм) в рефлектор; 5 – дно рефлектора, угол наклона к оси  $\sim 30^\circ$ .

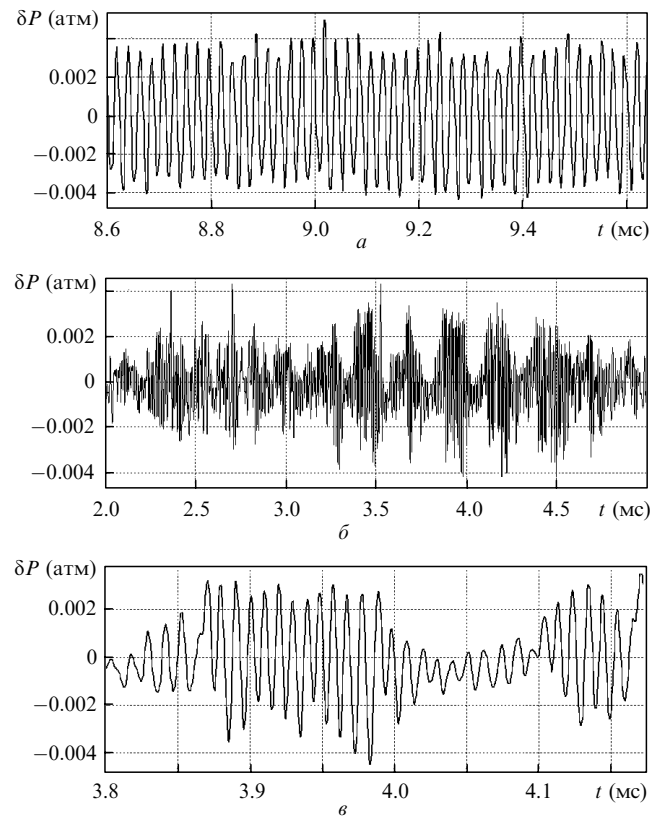


Рис.5. Пульсации давления  $\delta P$ , создаваемые при горении ОПР в рефлекторе с  $D_r = 0.5$  см,  $H = 4.6$  см,  $V = 400$  м/с,  $D_j = 0.3$  см при  $f = 50$  кГц,  $W = 1300$  Вт (а) и  $f = 100$  кГц,  $W = 1200$  Вт (б, в).

Табл.1. Условия и результаты экспериментов.

$f$ (кГц)	$\varphi$ (кГц)	$D_r$ (мм), [H (мм)]	$N$	$V$ (м/с)	$W$ (Вт)	$F_j$ (г)	$F_r$ (г)	$J_r$ (Н/кВт)	Материал рефлектора
45	ИП	5, [46]	–	300	1300	80	40	0.61	дюралюминий
45	ИП	5, [46]	–	400	1300	141	69	1.06	–"–
100	ИП	5, [46]	–	400	1200	155	54	1.08	–"–
100	1	15, [50]	30	300	720	49	4	0.085	–"–
45	1	15, [50]	15	50	720	0.9	2.1	0.042	–"–
45	1	15, [50]	15	300	720	49.1	4.5	0.09	–"–
45	1	15, [50]	15	50	720	1.2	1.4	0.028	дюралюминий*
45	1	15, [50]	15	100	720	6.3	5.6	0.11	–"–
45	1	15, [50]	15	300	720	62.7	4	0.08	–"–
45	1	15, [50]	5	170	500	17.7	3.5	0.1	–"–
45	2	15, [50]	5	100	600	6.3	4.8	0.11	–"–
45	2	15, [50]	5	164	600	18.5	7.5	0.18	–"–
45	2	15, [50]	5	300	600	70	–4	0.095	–"–
12.5	ИП	25, [35]	–	60	430	2.4	4	0.13	кварц
12.5	ИП	25, [35]	–	100	430	5	7	0.23	–"–
12.5	ИП	25, [35]	–	150	430	11	11	0.37	–"–
12.5	ИП	25, [35]	–	300	430	51	16	0.53	–"–
12.5	ИП	25, [35]	–	50	430	6	1	0.033	дюралюминий**
12.5	ИП	25, [35]	–	100	430	12	7	0.23	–"–
12.5	ИП	25, [35]	–	300	430	195	–97	–3.2	–"–

Примечание. Лазерное излучение фокусировалось на расстоянии 1 см от дна рефлектора; \* шесть отверстий диаметром 5 мм по периметру рефлектора на расстоянии 7 мм от его выхлопа; \*\* шесть отверстий диаметром 5 мм по периметру рефлектора на расстоянии 15 мм от его выхлопа.

средней мощностью  $W \approx 1200$  Вт (поглощаемая мощность  $W_a \approx 650$  Вт). Через несколько секунд после включения ОПР рефлектор нагревался до температуры более  $100^\circ\text{C}$ .

При  $f = 50$  кГц и  $V = 300$  м/с сила тяги  $F_r = 40$  г, а при  $V = 400$  м/с  $F_r = 69$  г; коэффициент связи  $J_r \approx 1.06$  Н/кВт. Стационарность силы  $F_r$  следует из того, что критерии объединения УВ перед областью ОПР выполнены. Вниз по потоку УВ не объединяются. Это видно из рис.5, на котором показаны пульсации давления  $\delta P(t)$ , измеренные вне рефлектора. Они характеризуют поглощение ИП излучения в ОПР, а значит, и силу тяги. При  $f = 50$  кГц нестабильность мала ( $\pm 5\%$ ), а при  $f = 100$  кГц модуляция  $\delta P(t)$  близка к 100%. Характерная частота амплитудной модуляции  $f_a \approx 4$  кГц близка к  $C_0/(2H)$ , где  $H$  – длина рефлектора. Возможное объяснение состоит в том, что при высокой частоте  $f$  плазма не успевает выноситься из зоны горения ОПР, и это вызывает уменьшение эффективности формирования УВ. К такому же результату может приводить и загибание струи, если давление в КВ сравнимо с давлением в камере. Таким образом, ИП излучение применимо для создания стационарной силы тяги в лазерном двигателе.

### 3.3. Импульсный режим

С целью поиска оптимальных параметров лазерного двигателя выполнено примерно 100 пусков ОПР. Некоторые данные приведены в табл.1. Варьировались диаметр и длина рефлектора, параметры излучения, скорость струи (от 50 до 300 м/с). При  $V = 50$  м/с эжекционный эффект мал, при  $V = 300$  м/с  $\approx C_0$  он сильный, а при  $V \approx 100$  м/с имеет место переходной режим. В некоторых случаях цилиндр с целью снижения эжекции перфорировался по окружности. ОПР создавался цугами импульсов излучения, в некоторых случаях – ИП излучением. Структура и частота  $\varphi$  следования цугов импульсов выбиралась из условия необходимости смены нагретого ОПР га-

за атмосферным воздухом. Длительность цугов составляла  $\sim 1/3$  от их периода, число импульсов  $N = 15$  или 30 (в зависимости от частоты  $f$ ). Механизмы нагрева – воздействие теплового излучения плазмы [23], турбулентной теплопроводности с характерным временем  $\sim 300$  мкс [24] и ударных волн.

Сила тяги  $F_r$  наблюдалась при уменьшении диаметра рефлектора и увеличении его длины. ОПР горел на расстоянии  $\sim 1$  см от дна рефлектора. Как видно из рис.6, ударные волны, создаваемые первыми мощными импульсами цугов, объединяются. При  $f = 100$  кГц энергия импульсов мала, что проявляется в нестабильности пульсаций давления внутри цугов. Увеличение энергии импульсов примерно в 2 раза на частоте  $f = 50$  кГц сопровождалось стабилизацией  $\delta P(t)$ . ОПР, горящий в рефлекторе большого диаметра ( $D_r/R_d \approx 4$ ) на таком расстоянии от его дна, что  $r/R_d \approx 3$ , не создавал тяги.

В табл.1 представлены также некоторые результаты измерений. Видно, что коэффициент связи  $J_r$  сильно зависит от многих параметров, достигая 1 Н/кВт в стационарном режиме и 0.53 Н/кВт в импульсном. В настоящее

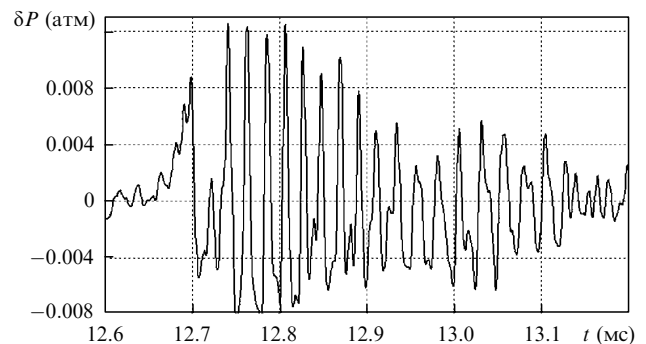


Рис.6. Пульсации давления  $\delta P$  при ОПР, создаваемом цугами импульсов с  $\varphi = 1.1$  кГц,  $f = 50$  кГц,  $W = 720$  Вт,  $N = 15$ ,  $V = 300$  м/с,  $D_r = 1.5$  см,  $H = 5$  см,  $D_j = 4$  мм и  $F_r = 4.5$  г.

время методы масштабирования по мощности лазерных систем и лазерных двигателей, используемые и для проведения лабораторных опытов, активно развиваются [10, 25]. Покажем это на примерах. В опытах наблюдался эффект, когда ОНР создавал «отрицательную» силу  $F_r = -97$  г (см. табл.1), что соответствует торможению ракеты. Значение  $J_r$  можно увеличить примерно в 1.5 раза за счет увеличения энергии импульсов и уменьшения их длительности до  $\sim 0.2$  мкс. Важным показателем, характеризующим работу лазерного двигателя при полете на больших высотах, является эффективность  $I_m$  использования рабочего газа. В экспериментах значение  $I_m = 0.005$  кг·Н<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup> можно существенно уменьшить при использовании более мощного излучения. Для их проведения необходимо, чтобы мощность ИП излучения была не менее 10 кВт. В этом случае  $F_r$  существенно превысит все другие силы. Следует учитывать газодинамические эффекты, влияющие на величину  $F_r$ , например донное сопротивление при скорости полета  $\sim 1$  км/с.

Таким образом, эксперимент подтвердил, что импульсно-периодическое лазерное излучение создает стационарную тягу с высоким коэффициентом связи. Разработка методов масштабирования лазерных систем, увеличение мощности выходного излучения и оптимизация процесса взаимодействия УВ позволят существенно повысить эффективность лазерного двигателя.

Работа поддержана РФФИ (грант № 06-08-01192).

- Kantrowitz A.R. *Astronautics and Aeronautics*, **10** (5), 74 (1972).
- Пирри А.Н., Монслер М., Небольсайн Р. *Ракетная техника и космонавтика*, **12** (9), 112 (1974).
- Агеев В.П., Барчуков А.И., Бункин Ф.В., Конов В.И., Прохоров А.М., Силенок А.С., Чаплиев Н.И. *Квантовая электроника*, **4** (12), 2501 (1977).
- Schall W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4065**, 472 (2000).
- Myrabo L.N., Raizer Yu.P., Surzhikov S. *II Int. Symp. on Beamed Energy Propulsion* (Sendai, Japan, 2003, p. 534).
- Sherstobitov V.E., Kalitievskiy N.A., Kuprenyuk V. I., Rodionov A.Yu., Romanov N.A., Semenov V.E., Soms L.N., Vysotina N.V. *III Int. Symp. on Beamed Energy Propulsion* (Sendai, Japan, 2003, p. 296).
- Hasson V., Mead F., Larson C., Chou H. *III Int. Symp. on Beamed Energy Propulsion* (Troy, New York, 2004, p. 32).
- Mori K., Sasoh A., Myrabo L. *III Int. Symp. on Beamed Energy Propulsion* (Troy, New York, 2004, p. 155).
- Hartley C.S., Partwood T.W., Filippelli M.V., Myrabo L.N., Nagamatsu H.T., Shneider M.N., Raizer Yu.P. *III Int. Symp. on Beamed Energy Propulsion* (Troy, New York, 2004, p. 499).
- Аполлонов В.В., Егоров А.Б. Кийко В.В., Кислов В.И., Суздальцев А.Г. *Квантовая электроника*, **33** (9), 753 (2003).
- Grachev G.N., Ponomarenko A.G., Smirnov A.L., Shulyat'ev V.B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4165**, 185 (2000).
- Тищенко В.Н., Аполлонов В.В., Грачев Г.Н., Гулидов А.И., Запругаев В.И., Меньшиков Я.Г., Смирнов А.Л., Соболев А.В. *Квантовая электроника*, **34** (10), 941 (2004).
- Аполлонов В.В., Тищенко В.Н. *Квантовая электроника*, **34** (12), 1143 (2004).
- Аполлонов В.В., Тищенко В.Н. *Квантовая электроника*, **36** (7), 673 (2006).
- Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н., Смирнов А.Л., Трашкеев С.И., Стаценко П.А., Зимин М.И., Мякушина А.А., Запругаев В.И., Гулидов А.И., Бойко В.М., Павлов А.А., Соболев А.В. *Квантовая электроника*, **36** (5), 470 (2006).
- Bielech U., Budde M., Freisinger B., Ruders F., Schafer J.H., Uhlenbusch J. *Proc. ICPIG XXI* (Arbeitsgemeinschaft, Plasmaphysik APP-RUB, 1993, p. 253).
- Третьяков П.К., Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. *ДАН*, **336** (4), 466 (1994).
- Myrabo L.N., Raizer Yu.P. *AIAA Paper*, No. 94-2451 (1994).
- Борзов В.Ю., Михайлов В.М., Рыбка И.В., Савищенко Н.П., Юрьев А.С. *Инж.-физ. журн.*, **66** (5), 515 (1994).
- Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Смирнов А.Л., Стаценко П.А., Тищенко В.Н., Трашкеев С.И. *Квантовая электроника*, **35** (11), 973 (2005).
- Прохоров А.И., Конов В.И., Урсу И., Михайлеску И.Н. *Взаимодействие лазерного излучения с металлами* (М.: Наука, 1988).
- Коробейников В.П. *Задачи теории точечного взрыва* (М.: Наука, 1985).
- Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (М.: Наука, 1987).
- Тищенко В.Н., Антонов В.М., Мелехов А.В., Никитин С.А., Посух В.Г., Третьяков П.К., Шайхисламов И.Ф. *Письма в ЖТФ*, **22** (24), 30 (1996).
- Аполлонов В.В., Тищенко В.Н. *Квантовая электроника*, **37**, № 8 (2007).