

Механизм объединения ударных волн в лазерном воздушно-реактивном двигателе

В.В.Аполлонов, В.Н.Тищенко

Рассмотрен новый подход к проблеме создания лазерного воздушно-реактивного двигателя (ЛВРД), основанный на использовании механизма объединения ударных волн, генерируемых оптическим пульсирующим разрядом (ОПР). Для получения ОПР предлагается использовать мощное импульсно-периодическое лазерное излучение с малой длительностью (150 – 250 нс), энергией 20 – 200 Дж и частотой следования импульсов до 100 кГц. Формирование ОПР с помощью матрицы рефлекторов позволит в несколько раз повысить эффективность лазерного излучения, используемого при создании ЛВРД, избежать сильных ударных нагрузок на аппарат, исключить термическое воздействие лазерной плазмы на рефлектор, а также уменьшить экранировку лазерного излучения плазмой. Проведены оценки возможных величин тяги ЛВРД в условиях предлагаемого механизма объединения ударных волн в квазистационарную волну высокого давления.

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

В проектах вывода на орбиту легких космических аппаратов [1, 2] предполагается использовать лазерный воздушно-реактивный двигатель (ЛВРД). Импульсно-периодическое излучение с помощью фокусирующего рефлектора создает лазерные искры (рис.1), которые в свою очередь генерируют ударные волны (УВ), передающие часть своего импульса космическому аппарату (КА). Обычно параметры излучения, планируемые для реализации ЛВРД, таковы: средняя мощность 1 – 3 МВт, частота следования импульсов $f \approx 100 - 300$ Гц, их энергия $q \approx 10$ кДж, длительность импульсов $t_r = 15 - 30$ мкс. Перечисленные параметры ЛВРД представляются весьма неоптимальными. Удельный импульс максимален, если искра создается близко к рефлектору, но тогда неизбежны термическое разрушение его поверхности и экранировка поступающего излучения лазерной плазмой. В то же время на рефлектор КА действуют сильные ударные нагрузки.

Рассматриваемый в работе новый подход к созданию эффективного ЛВРД основан на использовании механизма объединения УВ, генерируемых оптическим пульсирующим разрядом (ОПР) в случае коротких импульсов излучения с большой частотой следования [3, 4]. При этом в ЛВРД энергия ОПР наилучшим образом преобразуется в постоянную силу, ускоряющую движение КА. Для работы ЛВРД перспективны опирающиеся на ракетные технологии мощные газодинамические лазеры, которые при постоянной накачке активной среды могут генерировать импульсы с $t_r = 150 - 250$ нс и частотой следования f до 100 кГц [5, 6]. Использование импульсно-периодических лазеров особенно эффективно, если ЛВРД

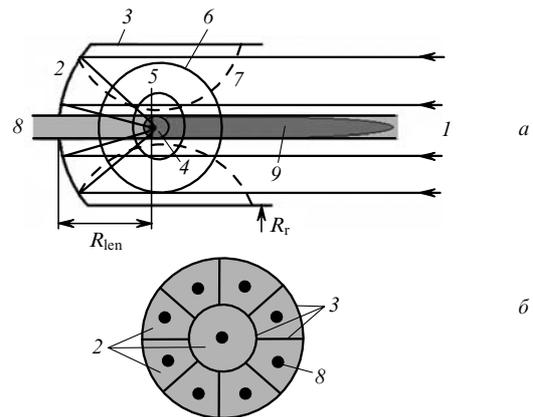


Рис.1. Схема рефлектора (а) и возможная структура матрицы рефлекторов (б) в лазерном воздушно-реактивном двигателе:

1 – лазерное импульсно-периодическое излучение; 2 – торец рефлектора – приемник излучения и механического импульса; 3 – боковая стенка рефлектора; 4 – каверна; 5 – ОПР; 6 – УВ; 7 – отраженная УВ; 8 – газовая струя; 9 – плазменная струя.

состоит из матрицы рефлекторов (МР). Приводимая ниже модель основана на оценках и численном моделировании в двумерном осесимметричном приближении импульсов тяги, генерируемых ОПР.

Предлагаемый нами подход иллюстрируется на рис.1 и состоит в следующем. На вход МР, состоящей из $N = 9$ рефлекторов, поступает импульсно-периодическое лазерное излучение с энергией импульсов $Q \approx 200$ Дж и $f \sim 100$ кГц, в соответствии с [3, 5] средняя мощность $W_a \approx 20$ МВт. Каждый лазерный импульс делится на N частей и, следовательно, мы имеем $q \sim Q/N$, $W_n = W_a/N$. Возможна МР в виде круга, в которой центральный рефлектор также имеет форму круга и цилиндрические стенки, а остальные восемь представляют собой части внешнего кольца круга. Все рефлекторы имеют боковые стенки и фокусирующую лазерное излучение сферическую торцевую часть, на которую поступает механический им-

В.В.Аполлонов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

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 29 октября 2004 г.

пульс. ОПР горит в каждом рефлекторе в газовой струе, инжектируемой через сопло в центре рефлектора. Струя выносит плазму из зоны горения ОПР, что необходимо для эффективной генерации последующих УВ. Скорость газовой струи превышает 1 км/с. Быстро распространяющиеся УВ, генерируемые ОПР, объединяются и создают квазистационарную волну (КВ), которая заполняет собой весь объем цилиндра. На поверхность рефлектора действует сила $F_a \sim \pi R_r^2 \delta P$ (R_r – радиус рефлектора, $\delta P = (P - P_0) > 0$ – избыточное давление, P_0 – давление воздуха в атмосфере). Сила F_a постоянна во времени, если в рефлекторе создается поток газа в том же направлении, что и струя, но с дозвуковой скоростью ~ 300 м/с. В противном случае необходимо использовать цуги лазерных импульсов, повторяющиеся с частотой F , импульсы в которых следуют с частотой $f \gg F$. Длительность цуга τ_t ограничена временем уменьшения плотности воздуха в рефлекторе. Смена газа происходит за время паузы между цугами $\tau_p \sim a_p R_{len} / C_0$ (R_{len} – длина цилиндрической стенки рефлектора, C_0 – скорость звука в воздухе, коэффициент $a_p \approx 1 - 2$).

Боковые стенки за счет отражения позволяют собрать на поверхности рефлектора $\sim 1/2$ от полного импульса КВ или одиночной УВ. Задача становится близкой в своей постановке к модели плоского взрыва, в котором удельный импульс J_p максимален. На рис.2 показаны сила F_a и удельный импульс J_p , рассчитанные для различных соотношений между R_{len} и R_r . Здесь, в отличие от традиционных схем, зависимость J_p от расстояния между ОПР и рефлектором и от его формы не критична. Это позволяет исключить термическое и ударное воздействия лазерной плазмы на рефлектор.

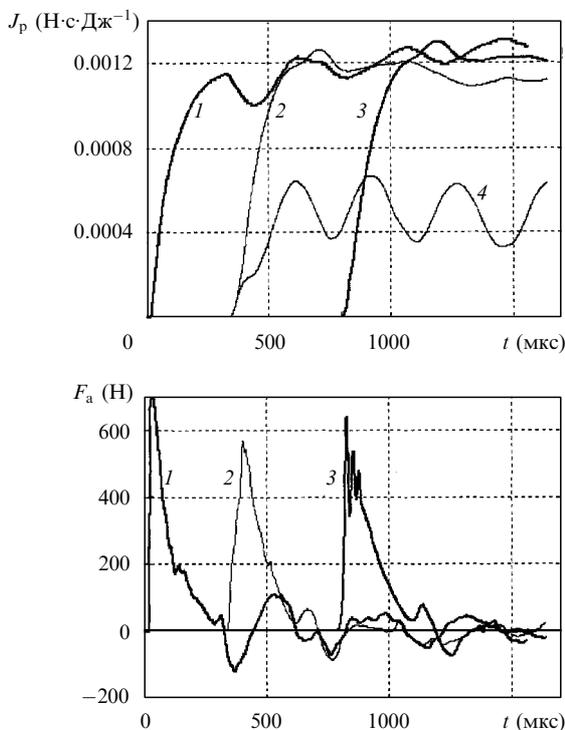


Рис.2. Временные изменения действующих на торцевую стенку цилиндра силы F_a и импульса J_p , созданных искрой с энергией $q = 54.8$ Дж, находящейся на оси цилиндра на расстоянии $R_{len} = 3$ (1), 16 (2) и 32 см (3). Кривая 4 получена при $R_{len} = 16$ см для диаметра рефлектора 5 см. Пульсации J_p – результат отражения УВ от боковых стенок и их движения по поверхности рефлектора.

Длительность лазерного импульса t_r выбирается с учетом следующих условий. Доля энергии, уносимая УВ, максимальна, если в искре поглощается вся энергия импульса, причем за время, меньшее времени расширения лазерной искры $t_e \approx (q/P_0)^{1/3}$, где q – энергия импульса в джоулях, t_e измеряется в микросекундах. Диаметр пучка на рефлекторе $d_b \approx F_f$ (F_f – фокусное расстояние рефлектора, d_b берется в сантиметрах), поэтому механизм оптического пробоя (светодетонационная или дозвуковая радиационная волна) действует на малом расстоянии от фокуса (равном длине искры Z_p) и в течение малого времени t_r . Далее излучение может поглощаться в распадающейся плазме некоторое время t_e . При постоянной в течение импульса мощности W длина искры Z_p , поглощаемая в ней энергия q и момент времени t_r распада светодетонационной волны [3] таковы:

$$Z_p \frac{d_b}{F_f} = 0.013 \left(\frac{W}{P_0} \right)^{1/2} \times \left\{ 1.93 + \ln P_0 + \ln \left[\left(\frac{W}{P_0} \right)^{1/2} (6.3 + \ln P_0)^{3/4} \right] \right\}^{3/4},$$

$$\frac{q}{P_0} \frac{d_b}{F_f} = 0.0014 \left(\frac{W}{P_0} \right)^{3/2} \times \left\{ 1.93 + \ln P_0 + \ln \left[\left(\frac{W}{P_0} \right)^{1/2} (6.3 + \ln P_0)^{3/4} \right] \right\}^{5/4},$$

$$t_r \frac{d_b}{F_f} = 0.0014 \left(\frac{W}{P_0} \right)^{1/2} \times \left\{ 1.93 + \ln P_0 + \ln \left[\left(\frac{W}{P_0} \right)^{1/2} (6.3 + \ln P_0)^{3/4} \right] \right\}^{5/4},$$

где W измеряется в мегаваттах. Если задано q , то при $P_{01} = 1$ атм мощность $W = 21.7(qd_f/F_f)^{0.617}$, $t_r = 0.0455(q \times F_f/d_f)^{0.381}$, $Z_p = 0.194q^{0.352}(F_f/d_f)^{0.648}$; при $P_{02} = 0.1$ атм имеем $W = 15(qd_f/F_f)^{0.588}$, $t_r = 0.0665q^{0.411}(F_f/d_f)^{0.588}$, $Z_p = 0.357q^{0.365}(F_f/d_f)^{0.635}$. Считая $q = 100$ Дж и $P_0 = 1$ атм, получаем $t_r = 0.263$ мкс, $W = 372$ МВт и $Z_p = 1$ см. Таким образом, для ЛВРД оптимальны импульсы длительностью 0.2 – 0.3 мкс.

Механизм объединения УВ действует в ЛВРД при выполнении следующих условий. УВ, выходя за пределы струи и объединяясь, создают КВ, если $f \geq 5.88C_0/R_d$, что в данной задаче выполняется всегда. ОПР, горящий в струе газа, преобразует лазерное излучение в УВ, если $V_g \geq 86f^{2/3}(W_n/P_g)^{1/3}$ (т.е. $V_g > 1.2 \times 10^5$ см/с), где V_g – скорость струи, P_g – статическое давление газа в струе в атмосферах, f измеряется в герцах, W_n – средняя мощность лазерного излучения в мегаваттах. Условия выхода УВ из струи и сноса плазмы ОПР выполняются при радиусе струи (в сантиметрах) $R_g = 0.11(q/P_g)^{1/3} \approx 0.11 \times q^{1/3}$.

Матрица рефлекторов должна соответствовать следующим требованиям. Ее поперечный размер (~ 1 м) определяется из условий транспортировки излучения в атмосфере и предотвращения пробоев на поверхности рефлекторов. Радиус рефлектора $R_r \approx 0.43\delta^{1/2}(q/P_{g2})^{1/3}$, длина боковых стенок $L_r \sim 2R_1 \approx 2a_r R_r$ ($a_r = 0.5 - 1$). Здесь $\delta \approx 0.03$ – приемлемая доля потерь излучения на плазме ОПР, $P_{g2} = 0.1$ атм – давление газа в струе. Отметим, что

Табл.1.

Тип ЛВРД	N	f (кГц)	q (Дж)	R_r (см)	R_{len} (см)	F_{a1} (кН)	F_{a2} (кН)	J_1 (Н/МВт)	J_2 (Н/МВт)	V_{g1} (км/с)	V_{g2} (км/с)	R_{g1} (см)	R_{g2} (см)
моно-	1	20	1000	50	25	64	23	2600	930	1.73	3.72	1	2.4
рефлек-	1	100	200	31	15	21.8	7.73	906	317	5.05	10.88	0.64	1.4
торный	1	100	200	31	9.5	50.1	17.78	2084	729	5.05	10.88	0.64	1.4
матрич-	1	100	25	15.5	5	12.5	4.45	4168	1458	2.52	5.44	0.32	0.7
ный	8	100	200	90	5	100*	35.6*	4168	1458	2.52	5.44	0.32	0.7

*Значения для F_{MR} .

$R_r/R_d \approx 1$ при $P_0 = 1$ атм. Действующая на поверхность рефлектора сила F_a и удельная сила J соответственно таковы:

$$F_a \approx \frac{81.4q^{0.67}P_0^{0.45}}{a_r^{1.64}P_{g2}^{0.12}\delta^{0.18}}, \quad J \equiv \frac{F_a}{W_n} \approx \frac{81.4 \times 10^6 P_0^{0.45}}{a^{1.64}fq^{1/3}P_{g2}^{0.12}\delta^{0.18}},$$

где F_a измеряется в ньютонах, J – в Н/МВт. На МР действует сила $F_{MR} = NF_a$.

Длительность цугов τ_t можно оценить как время прохождения первой в цуге УВ расстояния от ОПР до поверхности рефлектора и обратно: $\tau_t = 4.6 \times 10^{-4} q^{1/3}$ (оценка снизу). Здесь и далее $\delta = 0.03$, $P_{g2} = 0.1$, $a_p = 1$. Отношение времен $\tau_p/\tau_t = 0.5a_p L_p/R_{len}$, а их минимальное значение равно $0.5a_p$. Для одного рефлектора частота следования цугов $F = 2090/q^{1/3}$, их энергия $q_t = 4.63 \times 10^{-4} W_n q^{1/3}$, средняя мощность излучения в цуге $W_m = 2W_n/3$ и средняя сила в цуге $F_{am} \approx 2F_a/3$. За счет оптимизации рефлектора можно увеличить τ_t и КПД трансформации энергии лазера, генерирующего цуги.

В табл.1 сравниваются параметры матричного и монорефлекторного ЛВРД. Средняя мощность, подводимая к МР и к монорефлектору, равна 20 МВт. Вопросы оптимизации числа рефлекторов и геометрия МР нами не рассматриваются. Структуру МР следует выбирать с учетом ее использования для управления траекторией полета, создания необходимой энергии струй и силы тяги двигателя. Представленная в табл.1 МР содержит $N = 8$ сферических рефлекторов с цилиндрическими стенками, потери излучения, связанные с неоптимальной «упаковкой», не учитываются. Индексы «1» и «2» в обозначениях соответствуют условиям старта ($P_0 = 1$ атм) и окончания ($P_0 = 0.1$ атм) режима ЛВРД. Параметры в двух первых строках рассчитаны для разных частот f при $a_r = R_{len}/R_r = 0.5$. Уменьшая значение a_r до предельно малого (~ 0.3), можно при $f = 100$ кГц достичь высокого значения F_a (3-я строка). В монорефлекторном ЛВРД использование излучения с частотой $f > 50$ кГц затруднено – необходимо, чтобы струя двигалась с очень большой скоростью ($V_g \approx 5 - 10$ км/с). В двух последних строках для $f = 100$ кГц (при $a_r = 0.3$) приведены параметры отдельного рефлектора и МР в целом. В этом случае удельная сила J существенно больше, а скорость струи меньше. Значения V_g соответствуют диапазону скорости КА в процессе его ускорения, что облегчает создание струи. Важное преимущество МР – возможность управления траекторией полета с помощью ЛВРД. Например, изменяя параметры струи в соответствующем рефлекторе, можно изменить силу тяги в нем и тем самым создать вращающий момент на МР.

Плоская КВ, как следует из приводимых ниже результатов модельных расчетов, позволяет существенно увеличивать силу тяги J и, кроме того, вводить энергию в

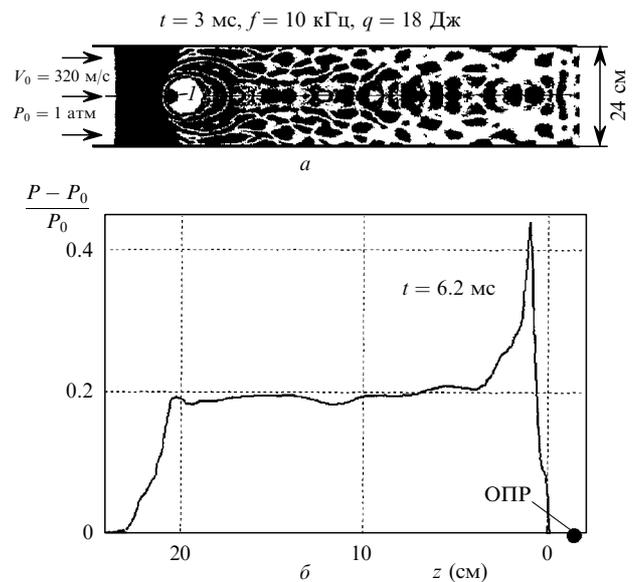


Рис.3. Поле давления воздуха, создаваемое при горении ОПР (I) в бесконечном цилиндре диаметром 24 см при скорости набегающего потока воздуха $V_0 = 320$ м/с и $P_0 = 1$ атм, в случае двумерного осесимметричного распределения давления для момента $t = 3$ мс после включения ОПР (в черных областях $P > P_0$) (а) и распределение избыточного давления воздуха в КВ на оси цилиндра при $t = 6.2$ мс (перед включением очередной искры); расстояние по оси z отсчитывается от заднего фронта КВ, находящегося вблизи ОПР, перед ОПР сформировалась плоская КВ, в которой давление не зависит от расстояния до оси цилиндра (б).

сверхзвуковой поток газа. Такая волна может формироваться в условиях точечного ОПР при наличии боковых стенок и при дозвуковой скорости движения ОПР относительно газа. Так, на рис.3 показаны газодинамические возмущения, создаваемые при горении ОПР в цилиндре ($R_r \approx 2R_d$). Видно, что перед точечным ОПР образовалась плоская КВ, в которой давление постоянно по радиусу и вдоль оси движения ОПР. Соответствующая избыточному давлению $\delta P = 0.2$ атм удельная сила $J = F_a/W_n = 900/0.18 = 5000$ Н/МВт. Если точечный ОПР горит в сверхзвуковом потоке, то УВ выносятся потоком [7] и не могут использоваться для ускорения КА.

Ограничение на скорость газа снимается в условиях «плоского» ОПР, который представляет собой матрицу синхронно пульсирующих точечных ОПР. Так как боковые стенки между ОПР отсутствуют, то УВ, генерируемые матрицей ОПР, объединяются и создают плоскую КВ. Давление в ней, как следует из расчетов, слабо изменяется на масштабах, сравнимых с характерным размером матрицы ОПР. Следовательно, такая волна может создавать постоянно действующую силу тяги. На рис.4 показаны сила F_a и механический импульс J_a , создаваемые плоской КВ при взаимодействии со стенкой. Здесь

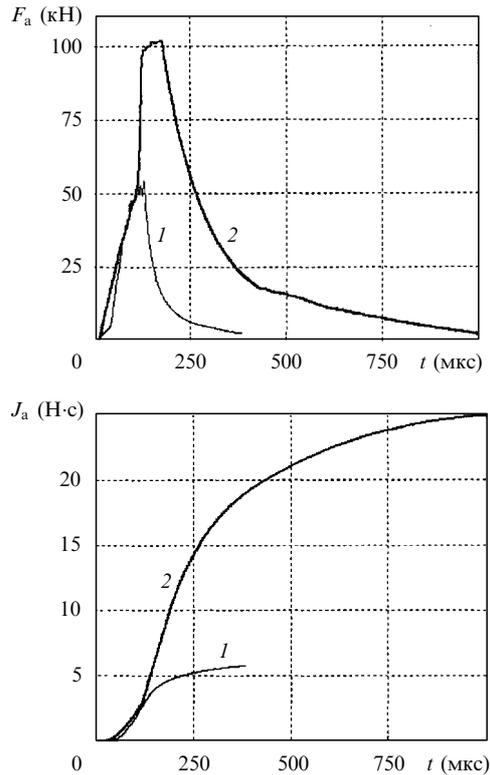


Рис.4. Временные зависимости силы F_a и механического импульса J_a , создаваемых при столкновении плоской КВ с торцом цилиндра (время отсчитывается от момента столкновения) через 350 мкс после включения ОПР (1) и через 1950 мкс, когда стенка находится на расстоянии 100 см от точки старта ОПР (2). Параметры плоского ОПР: радиус $R_a = 10$ см, толщина слоя $L = 1$ см, энергия в импульсе $q = 330$ Дж, частота $f = 50$ кГц, скорость движения по оси цилиндра $V_0 = 480$ м/с, радиус цилиндра $R_r = 26$ см.

плоский ОПР движется в цилиндре. В результате взаимодействия с боковыми стенками происходит накопление импульса в направлении движения ОПР. Рассчитанная по полувысоте $F_a/2$ удельная сила $J = 2900$ Н/МВт. На рис.5 показаны распределения давления и скорости газа в плоской КВ, которая формируется при движении плоского ОПР в неограниченном (по радиусу) пространстве со сверхзвуковой скоростью $V_0 = 830$ м/с. Массовая скорость газа примерно равна V_0 , полное давление P составляет ~ 6 атм, а удельная сила тяги J равна ~ 1300 Н/МВт.

Таким образом, механизм объединения УВ преобразует лазерное излучение в плоскую КВ, которая создает в космическом аппарате постоянно действующую силу тяги. В сочетании с использованием МР и струи газа КВ позволяют увеличить удельную силу тяги до рекордного уровня, превышающего 2500 Н/МВт, исключить термическое и ударное воздействие на рефлектор и экранировку излучения лазерной плазмой, а также использовать для работы ЛВРД мощные газодинамические лазеры, генерирующие импульсно-периодическое излуче-

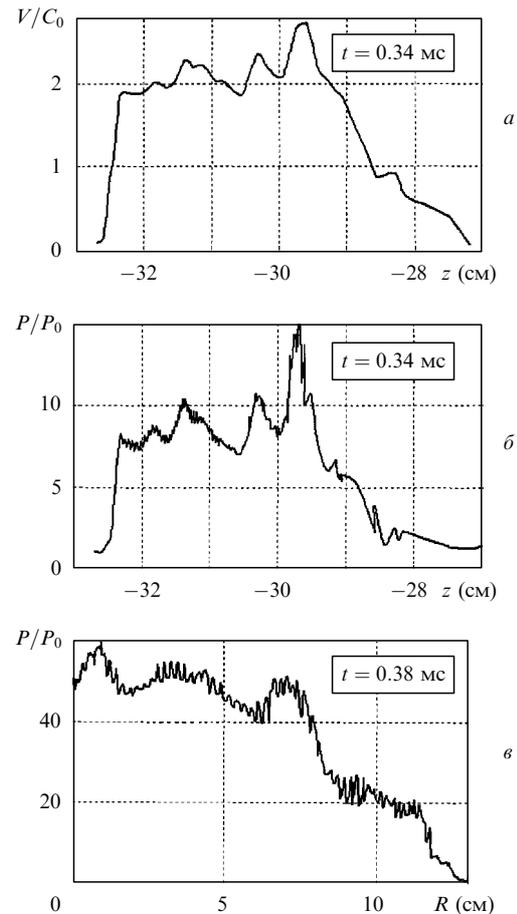


Рис.5. Распределения скорости и давления газа в плоской КВ на оси z (а, б) и по радиусу (в) для моментов времени перед (а, б) и в процессе столкновения (в) КВ с торцом цилиндра; КВ создается плоским ОПР, движущимся влево со скоростью $V_0 = 830$ м/с при следующих условиях: $P_0 = 0.1$ атм, радиус $R_0 = 8$ см, толщина слоя $L = 0.5$ см, $f = 50$ кГц, $q = 140$ Дж. Отсчет координат: ось z – от точки старта ОПР, R – от оси z .

ние с частотой до 100 кГц. Работа поддержана РФФИ (грант № 03-02-17716).

1. Kantrowitz A. *Astronautics and Aeronautics*, **10** (5), 74 (1972).
2. 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).
3. Apollonov V.V., Tischenko V.N. *Proc. of GCL-High Power Laser Conf.* (Prague: SPIE, 2004).
4. 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).
5. Apollonov V.V. *III Int. Symp. Beamed Energy Propulsion* (Troy, New-York, 2004).
6. Аполлонов В.В., Кийко В.В., Кислов В.И., Суздальцев А.Г., Егоров А.Б. *Квантовая электроника*, **33** (9), 753 (2003).
7. Третьяков П.К., Гаранин А.Ф., Грачев Г.Н., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. *Докл. РАН*, **351** (3), 339 (1996).