

## 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

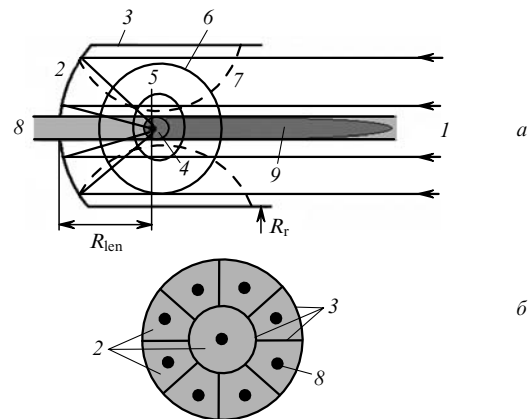


Рис.1. Схема рефлектора (а) и возможная структура матрицы рефлекторов (б) в лазерном воздушно-реактивном двигателе:

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  $\sim 300$  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  $\tau_t$  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.

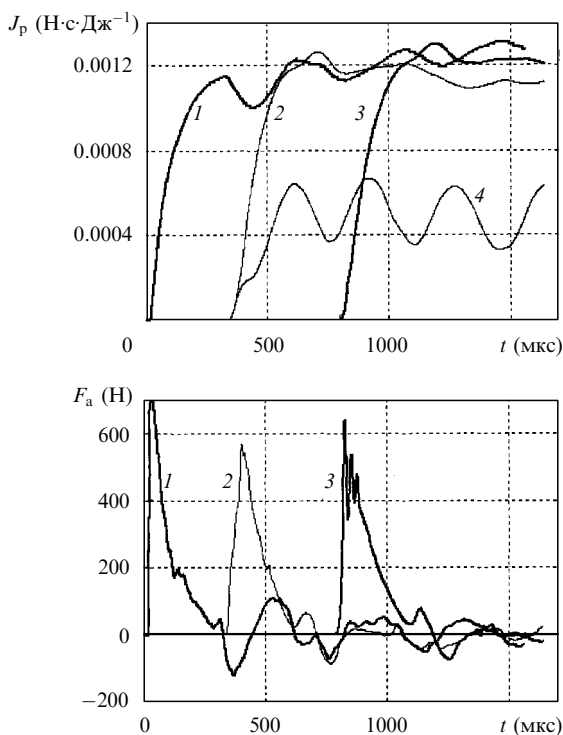


Рис.2. Временные изменения действующих на торцевую стенку цилиндра силы  $F_a$  и импульса  $J_p$ , созданных искрой с энергией  $q = 54.8$  Дж, находящейся на оси цилиндра на расстоянии  $R_{len} = 3$  (1), 16 (2) и 32 см (3). Кривая 4 получена при  $R_{len} = 16$  см для диаметра рефлектора 5 см. Пульсации  $J_p$  – 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 ( $\sim 1$  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  $\tau_t$  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  $\tau_t$  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 ( $\sim 0.3$ ), 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

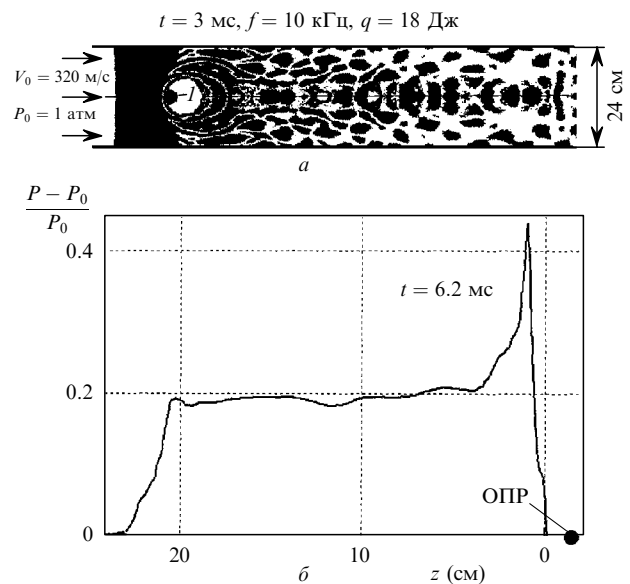


Рис.3. Поле давления воздуха, создаваемое при горении ОПР ( $I$ ) в бесконечном цилиндре диаметром 24 см при скорости набегающего потока воздуха  $V_0 = 320$  м/с и  $P_0 = 1$  атм, в случае двумерного осесимметричного распределения давления для момента  $t = 3$  мс после включения ОПР (в черных областях  $P > P_0$ ) (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

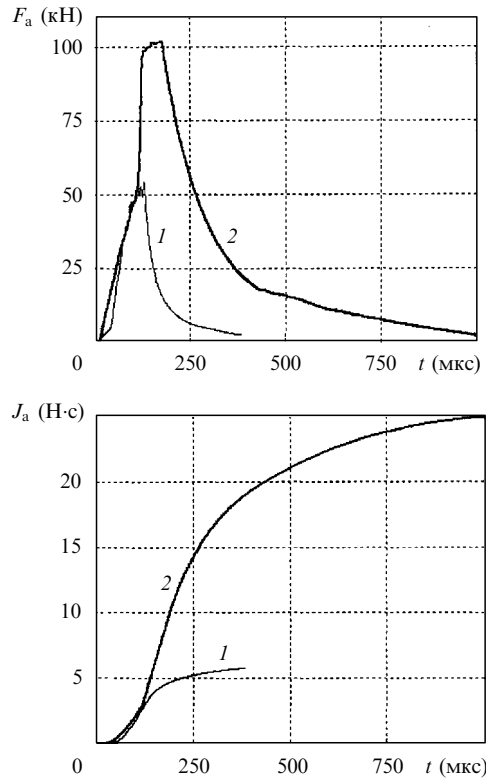


Рис.4. Временные зависимости силы  $F_a$  и механического импульса  $J_a$ , создаваемых при столкновении плоской КВ с торцом цилиндра (время отсчитывается от момента столкновения) через 350 мкс после включения ОПР (1) и через 1950 мкс, когда стенка находится на расстоянии 100 см от точки старта ОПР (2). 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  $\sim 6$  атм, а удельная сила тяги  $J$  равна  $\sim 1300$  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-

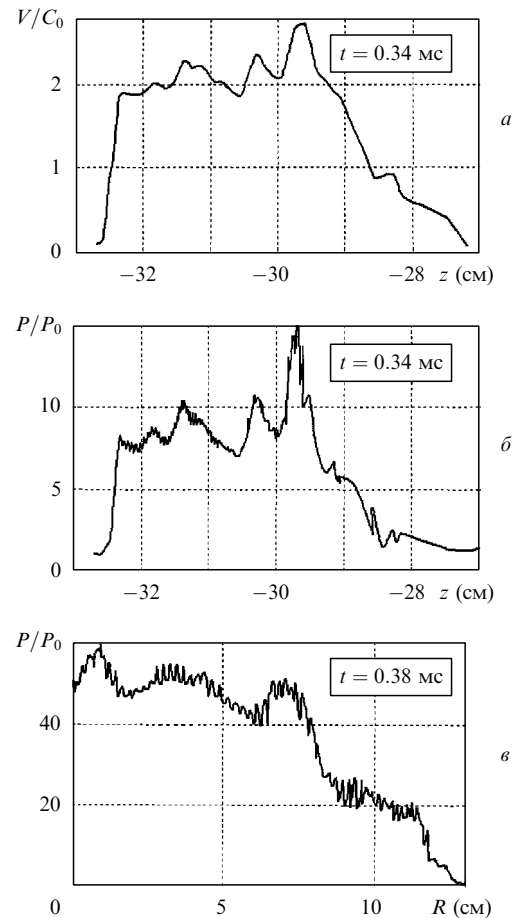


Рис.5. Распределения скорости и давления газа в плоской КВ на оси  $z$  (а, б) и по радиусу (в) для моментов времени перед (а, б) и в процессе столкновения (в) КВ с торцом цилиндра; КВ создается плоским ОПР, движущимся влево со скоростью  $V_0 = 830$  м/с при следующих условиях:  $P_0 = 0.1$  атм, радиус  $R_0 = 8$  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).