

3. Bayle M., Bayle P., Crokaert M. The development of breakdown in a homogeneous field at overvoltages in helium-neon mixtures and nitrogen // J. Phys. D: Appl. Phys.— 1975.— V. 8.— P. 2181.
4. Kline L. E. Calculation of discharges initiation in overvolted parallel-plane gaps // J. Appl. Phys.— 1974.— V. 45, N 5.
5. Reininghaus W. Calculation of streamers in gaseous discharges // J. Phys. D: Appl. Phys.— 1973.— V. 6.— P. 1486.
6. Dhali S. K., Williams P. F. Numerical simulation of streamer propagation in nitrogen at atmospheric pressure // Phys. Rev.— 1985.— V. 31, N 2.
7. Лозанский Э. Д., Фирсов О. Б. Теория искры.— М.: Атомиздат, 1975.
8. Dawson G. A., Winn W. P. Model of streamer propagation // Z. Phys.— 1965.— Bd 183, N 2.
9. Смирнов Б. М. Физика слабоионизированного газа.— М.: Наука, 1972.
10. Geary J. M., Penney G. W. Charged-sheath model of cathode-directed streamer propagation // Phys. Rev.— 1978.— V. 17, N 4.
11. Бортник И. М., Кочетов И. И., Ульянов К. И. Математическая модель лавинно-стримерного перехода // ТВТ.— 1982.— Т. 20, вып. 2.
12. Петер Г. Электронные лавины и пробой в газах.— М.: Мир, 1968.
13. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах.— М.: Мир, 1977.
14. Kanl V. W., Seyfried T. W. Die Lebensdauer der angeregten Reaktanten in Ventralreaktionen // Z. Naturforsch.— 1963.— Bd 18a.— S. 432.
15. Смирнов Б. М. Возбужденные атомы.— М.: Энергоиздат, 1982.
16. Кремнев В. В., Месяц Г. А., Янкевич Ю. Б. О развитии одиночной электронной лавины в газе в наносекундном диапазоне // Изв. вузов. Физика.— 1970.— Вып. 2.
17. Rodin A. V., Starostin A. N. On the theory of cathode-directed streamer // Proc. 11th Intern. Conf. on phenomena in ionized gases.— Prague, 1973.

Поступила 11/XI 1987 г.

УДК 533.95

СИЛЬНОЕ СЖАТИЕ ВЕЩЕСТВА ПРИ ПОМОЩИ КУМУЛЯЦИИ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

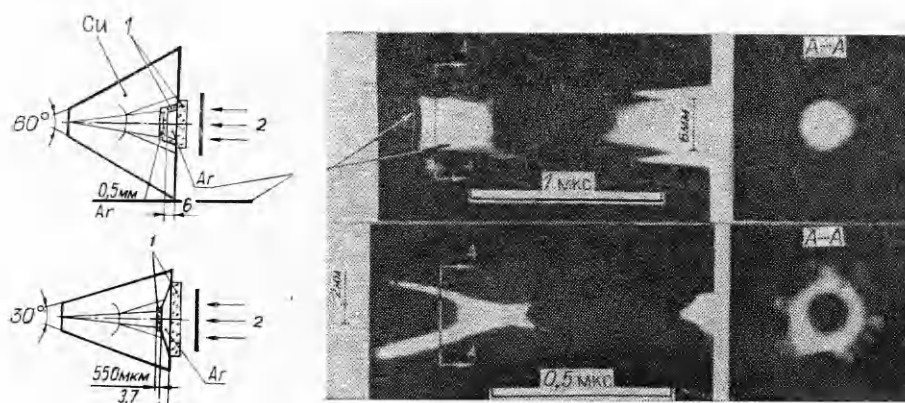
*Г. Дерентович
(Варшава)*

В Институте физики плазмы и лазерного микросинтеза выполняются теоретические и экспериментальные исследования различных физических явлений, которые происходят в веществе при высокой плотности энергии. Работы ведутся с использованием различных экспериментальных методов, которые включают в себя: лазерный метод, метод сильных электронных пучков, системы с плазменным фокусом и методы, использующие взрывчатые вещества как источник энергии. Что касается последней группы методов, высокая плотность энергии достигается здесь при использовании взрывных генераторов и сходящихся к оси детонационных и ударных волн (УВ). В конических генераторах детонационных (ударных) волн получены маховские волны очень большой интенсивности.

Высокие скорости металлических лайнеров достигнуты в цилиндрических генераторах. Для ускорения лайнеров применялось промежуточное устройство. Взрывные генераторы, разработанные в институте, используются для создания и сжатия дейтериевой плазмы в различных системах.

Настоящая работа — обзор, и поэтому в нее не включены детали, связанные с теоретическими исследованиями используемых моделей и с экспериментальными подробностями.

1. Взрывные системы генерации мощных маховских волн в концентрических системах. Явления, связанные с нерегулярным отражением и получением маховских волн при косом столкновении УВ, интересны с точки зрения кумуляции энергии. В плоских системах наблюдается увеличение давления на фронте маховских волн по сравнению с давлением первичных волн. Теоретическое описание этого явления и результаты экспериментов приведены в [1, 2]. Более значительное увеличение давления можно получить в осесимметричных системах, в которых в результате нерегулярного отражения в центре системы возникают маховские волны большой интенсивности. Такое явление исследовалось во взрывных системах с цилиндрическими или коническими образцами [3, 4], в которых зарегистрированы давления на фронте маховских волн от 0,2 до 1,8 ТПа. Этим



Р и с. 1 (вместо 1 мкс следует читать 0,75 мкс, а вместо 0,5 мкс — 0,38 мкс).

способом получена большая концентрация энергии и показана возможность увеличения динамического давления в 30 раз по сравнению с давлением в детонационной волне. Разработанные взрывные генераторы использовались для изучения твердых тел при высоких давлениях и, в частности, для определения ударных адиабат различных веществ.

Наши эксперименты проводились с целью показать возможность получения больших значений давления для меньших углов у вершины конуса в меди по сравнению с [4]. Из теоретических исследований, выполненных с использованием двумерного численного расчета [5], видно, что для конуса с углом раствора $\alpha = 30^\circ$ может быть достигнуто давление $p \sim 4,0$ ТПа; эксперименты подтвердили это. Таким образом, можно увеличить давление по сравнению с детонационным в 80 раз. Экспериментальные исследования системы проводились с максимальной тщательностью и использованием различных электрических и оптических диагностик [6]. При этом показана возможность использования биметаллических датчиков Cu—Ni—Cu для определения давления на фронте мощных УВ в диапазоне от 0,1 до 1,0 и даже 3,0 ТПа. Изменения ЭДС пары металлов показывают насыщение при $p > 0,1$ ТПа. Полные результаты измерений содержатся в [6], где в качестве примера приведены результаты оптической регистрации маховских волн для конусов с $\alpha = 30$ и 40° (рис. 1, где 1 — плексигласовая мишень, 2 — камера).

В табл. 1 представлены параметры создаваемых маховских волн. Максимальное давление на фронте маховской волны 4,6 ТПа, и диаметр головы 2 мм. В результате взаимодействия волны с плексигласовой мишенью скорость УВ в плексигласе достигала 36,7 мм/мкс, а в аргоне 43,0 мм/мкс.

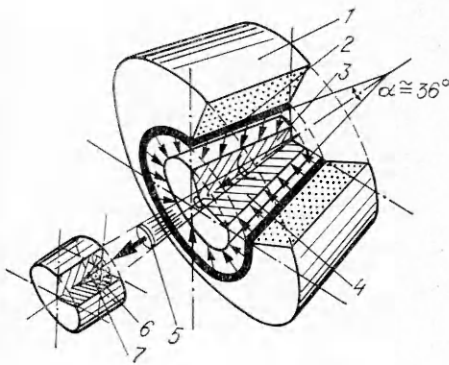
Так как эксперименты дали столь высокие параметры УВ, заманчиво использовать разработанную коническую систему для генерации и сжатия высокотемпературной плазмы. Теоретические оценки показали, что

Т а б л и ц а 1

Угол, град	Давление на фронте маховской волны, ТПа	Диаметр маховской волны, мм	Скорость фронта УВ, мм/мкс		Скорость детонации ВВ, мм/мкс
			Плексигласовая мишень	Аргон	
	Медный конус				
30	3,33	1,61	31,2	38,5	7,3
36	3,0	2,0	30,0	34,0	7,3
60	1,0	6,8	18,0	22,4	7,3
36	4,60	2,1	36,7	43,0	8,3

в газообразном дейтерии можно достигнуть температур порядка 0.51 кэВ и максимального сжатия порядка 10^3 [7], т. е. в разработанной системе можно ожидать осуществления термоядерного синтеза с выходом нейтронов на уровне 10^6 — $2 \cdot 10^7$ нейтронов за выстрел.

Выполненный численными методами дополнительный анализ по оптимизации согласуется с вышеуказанными результатами предварительных оценок [8]. Приведенные для системы, представленной на рис. 2, эксперименты в общем подтвердили результаты расчетов [9] (1 — конденсированное ВВ ($g = 1,78$, $D = 8,3$), 2 — медный лайнер ($v_l \approx 5,0$ мм/мкс), 3 — медный конус, 4 — маховская волна, 5 — полиэтиленовая пластина ($v = (4-5) \cdot 10^6$ см/с), 6 — золотой конус, 7 — газообразный D_2).



Р и с. 2

В трех сериях экспериментов для газообразного D_2 произведена реакция термоядерного синтеза с максимальным выходом нейтронов на уровне $N = 3 \cdot 10^7$ нейтронов/выстрел. Этот результат подтверждает достижение высоких параметров УВ в медном конусе ($p \approx 4,0$ ТПа) и достижение необычайно высокой концентрации энергии в малом объеме газообразного D_2 .

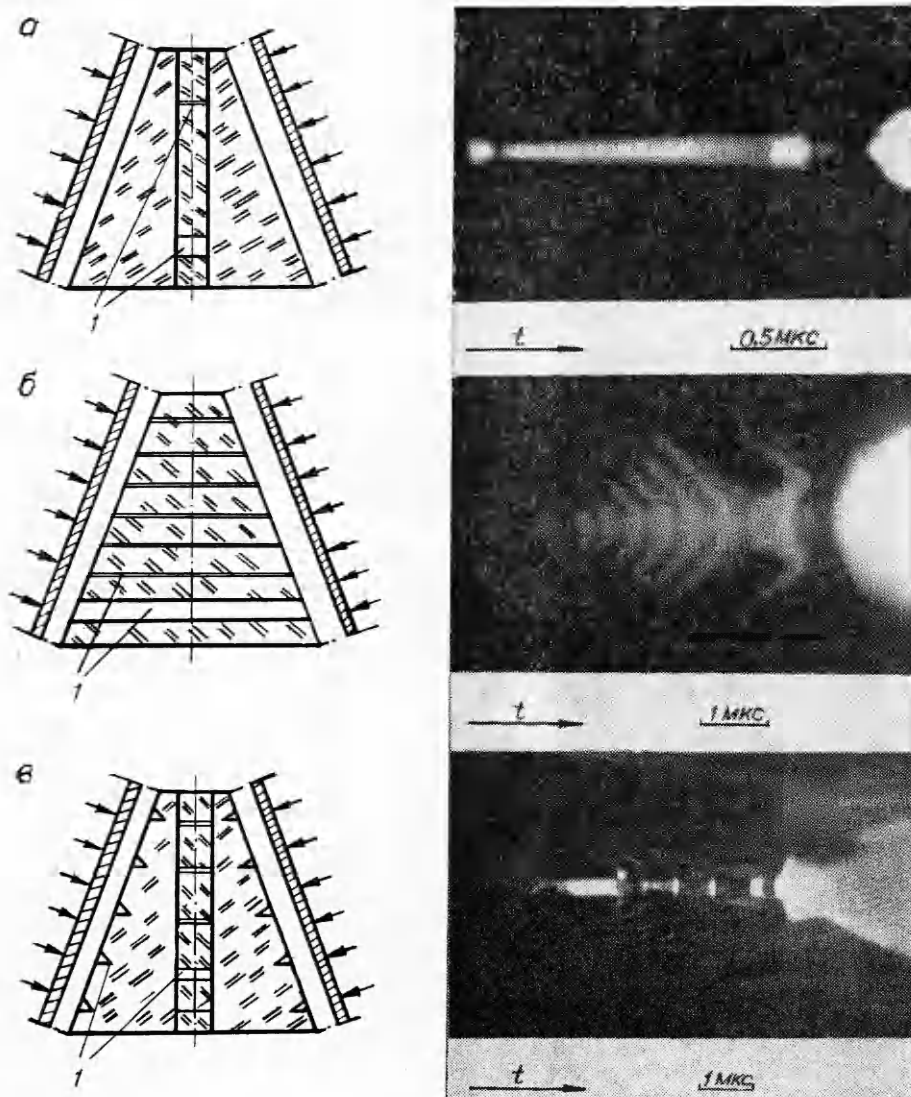
Приведенные результаты стимулировали исследования так называемой биконической системы, в которой можно осуществить столкновение двух мощных маховских волн. Предполагалось, что в центре такой системы должны быть большие динамические давления и сверхвысокая концентрация энергии. Анализ формы первичных волн показывает, что волна сжатия, приходящая к центру системы, окажется близкой к сферической, что приведет к дополнительному увеличению параметров сжатия.

Детальный анализ системы проведен с использованием конусов из плексигласа. При этом удалось оценить изменения угла и диаметра маховской волны, а также скорость вдоль оси конуса [10]. Для точно изготовленных (в оптическом смысле) плексигласовых конусов находятся значения параметров маховской волны с одновременным определением угла соударения медного конуса и угла распространения конической падающей волны. На рис. 3 (1 — воздушные промежутки) представлены схемы исследованных систем и фоторегистрограммы процесса распространения маховской волны в конусе.

Для того чтобы рассмотреть возможности практической реализации биконической геометрии, проведена серия экспериментов с оптической регистрацией траекторий маховских волн от двух синхронно действующих конических систем. Схема процесса дана на рис. 4 (1 — цепь задержки, 2 — измеритель времени SYSTRON, 3 — измеритель времени 4КМС Т-1201, 4 — высоковольтная система). В результате выяснилось, что с использованием специальной системы инициирования ВВ неодновременность прихода маховских волн может быть сделана не хуже 100 нс [11].

Дальнейшие эксперименты состояли из двух серий с «закрытыми» биконическими системами. В начальной серии они выполнены в системе, в которой нагружался контейнер с газообразным D_2 при атмосферном давлении. Проведена регистрация нейтронного выхода ($N \approx 10^5$). Импульс регистрировался диагностической системой, содержащей сцинтилляционный зонд, осциллограф, а также систему задержки со счетчиком импульсов. Полное описание экспериментов представлено в [12]. Неплохие результаты, полученные в этой серии, подтверждают принцип действия исследуемой системы и системы диагностики.

Вторая серия экспериментов поставлена для оценки параметров сжатия твердых мишеней (UD_3 и UD_2T). На рис. 5 приведен чертеж

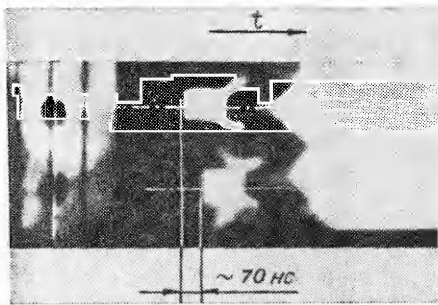
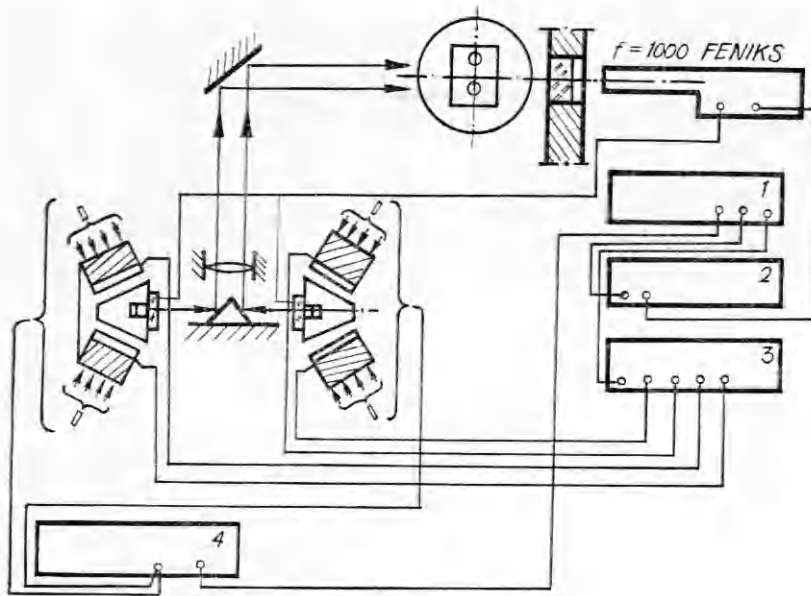


Р и с. 3

системы, в которой выполнены простые теоретические оценки столкновения двух маховских волн (1 — фронт маховской волны, 2 — падающая волна, 3 — конденсированное ВВ, 4 — медный лайнер, 5 — медный конус, 6 — твердотельная мишень $UD_3 : UD_2T$). Давление волн $p \approx 4,0$ ТПа, а после отражения достигало 10–15 ТПа, в то время как температура $T \approx 1,5 \cdot 10^6$ К и плотность $\rho \approx 16,6$ г/см³ ($\rho_0 = 5$ г/см³).

Результаты указанных оценок и начальных экспериментов приводят к выводу, что если в исследуемой системе достигаются параметры, необходимые для протекания термоядерного синтеза, то измерение нейтронного выхода можно рассматривать как метод диагностики таких параметров. В особенности это относится к «закрытой» системе, где использование других диагностик невозможно.

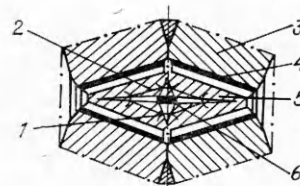
В основных экспериментах, выполненных с цилиндрическими мишенями UD_3 и UD_2T малых размеров (длина 8 мм и диаметр 2 мм) и начальной плотностью $\rho_0 = 5$ г/см³, получен выход нейтронов. Зарегистрированные импульсы, показанные на рис. 6 ($N \approx 10^5$ нейтронов/выстрел) и 7 ($N \approx 10^7$ нейтронов/выстрел), подтверждают, что в разработанной биконической системе достигается кумуляция энергии как результат двойно-



Р и с. 4

на схема экспериментальной взрывной системы. Характерная черта ее состоит в начальном нагреве газообразного дейтерия до высокой температуры в результате аксиального столкновения двух создаваемых взрывом УВ большой интенсивности. Начальный нагрев должен быть первой фазой процесса. Во второй фазе за ним следует адиабатическое сжатие дейтерия цилиндрическим лайнером, также ускоряемым взрывом до высокой скорости. На рис. 8 показан чертеж этой системы (1 — цилиндрическая волна детонации, 2 — конденсированное ВВ, 3 — генератор Войтенко, 4 — медный лайнер, 5 — газообразный D_2). В ней для получения двух сверхскоростных струй газообразного D_2 предполагается применение двух взрывных генераторов Войтенко, а для осуществления адиабатического сжатия газа — использование многослойного металлического лайнера.

Численные расчеты выполнены на основе полной гидродинамической модели [17, 18] с учетом потерь на излучение, теплопроводность и ионизацию. В вычислениях приняты следующие данные, которые получены в реальной экспериментальной системе: начальная скорость цилиндрического лайнера $v_l = 1,5$ см/мкс, начальный радиус ускоряемого лайнера $R_l = 0,4$ см, толщина стенки лайнера $g_l = 0,01$ см, скорость фронта УВ в D_2 вдоль продольной оси системы $D = 6,0$ см/мкс, начальное давление дейтерия $p_0 = 0,12 \cdot 10^5$ Па. Кроме того, в

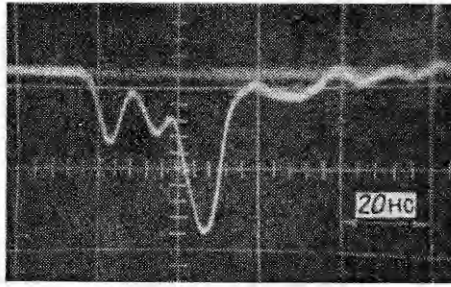


Р и с. 5

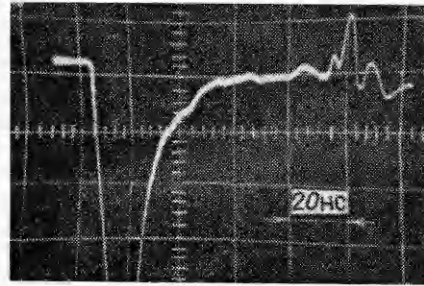
го сжатия сверхвысокими динамическими давлениями на уровне, сопоставимом с теоретическими оценками.

Данные, связанные с теоретическими оценками и экспериментами, приведены в [13, 14].

2. Аксиально-цилиндрическая система кумуляции энергии для сжатия плазмы. С. Калиски выдвинул идею аксиально-цилиндрического сжатия и получения высокотемпературной дейтериевой плазмы [15]. Одна из возможностей ее осуществления представлена в [16], где да-



Р и с. 6



Р и с. 7

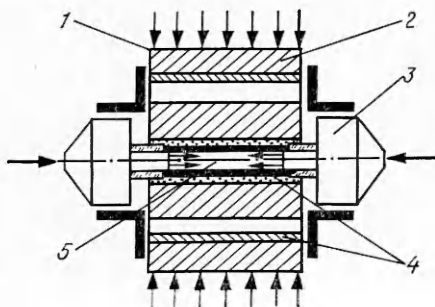
расчетах приняты согласно теоретическим оценкам значения T_0 и ρ_0 дейтерия после столкновения двух УВ в центре системы: $T_0 = 10^5 - 2 \cdot 10^5$ К, $\rho_0 = 2 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4}$ г/см³.

На рис. 9 и 10 показаны результаты вычислений для следующих начальных параметров: 1 — $T_0 = 2 \cdot 10^5$ К, $\rho_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ г/см³; 2 — $T_0 = 10^5$, $\rho_0 = 4 \cdot 10^{-4}$; 3 — $T_0 = 10^5$, $\rho_0 = 4 \cdot 10^{-4}$, $\tilde{z} = 1,5$ (\tilde{z} — повышенная степень ионизации); 4 — $T_0 = 300$ К, $\rho_0 = 4 \cdot 10^{-4}$. Видно, что начальный нагрев газа в результате столкновения сильных аксиальных УВ играет существенную роль в процессе сжатия и значительно влияет на уровень выхода нейтронов. Очень важно также, что измеряемый уровень эмиссии ($\sim 10^4$) возникает при довольно невысокой степени сжатия плазмы ($\tilde{\rho}/\rho_0 \sim 10^2$), а так как эта величина вполне реальна, упомянутое обстоятельство имеет большое значение.

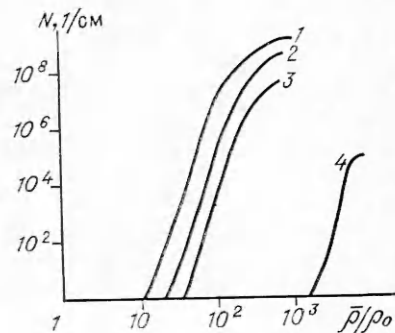
Осуществление изложенной концепции начато с детальных экспериментальных исследований взрывных систем для создания быстрых струй газообразного D₂ и цилиндрических систем ускорения металлического лайнера до высоких скоростей.

3. Исследования сверхбыстрых струй газообразного D₂ и их столкновений. В [19] описаны эксперименты с генератором Войтенко для оценки влияния его характеристик на кинетические параметры струй газообразного D₂. В хорошо известной схеме генератора влияние толщины ускоряемого дюралюминиевого лайнера на характер изменения скорости фронта УВ в D₂ определен как функция расстояния от выходного отверстия камеры сжатия. Найден также диапазон изменения максимальной скорости фронта УВ. При использовании мощного ВВ (RDX, $D = 8,7$ мм/мкс, $\rho_0 = 1,76$ г/см³) для разгона лайнера до скоростей в пределах от 4,2 до 6,5 мм/мкс максимальная скорость УВ в дейтерии изменялась в узком диапазоне от 58 до 63 мм/мкс. Полученные результаты приведены на рис. 11 и 12.

Для дальнейших исследований выбран один из вариантов генератора, удовлетворяющий вышеперечисленным требованиям для осесимметричной системы, и проведена серия экспериментов, в которых осуществлено

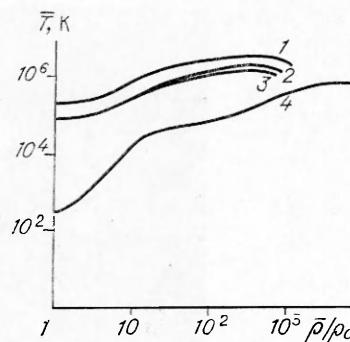


Р и с. 8



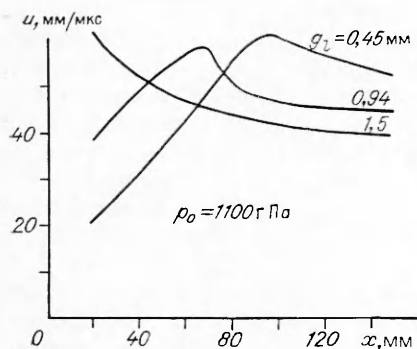
Р и с. 9

соударение двух высокоскоростных струй газообразного дейтерия. Экспериментальная сборка показана на рис. 13. Эксперименты подтвердили результаты, относящиеся к кинематическим параметрам струй дейтерия. Кроме того, оптическая регистрация процесса позволила получить некоторую информацию об отклонении места соударения струй от центра системы. Это отклонение составило $\Delta x \approx 4$ мм и послужило основой для оценки возможности синхронизации работы полной системы. В экспериментах максимальная скорость УВ $v_{\max} \approx 61$ мм/мкс. Пример фоторегистрации процесса приведен на рис. 14.

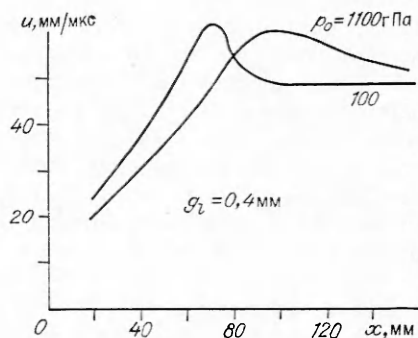


Р и с. 10

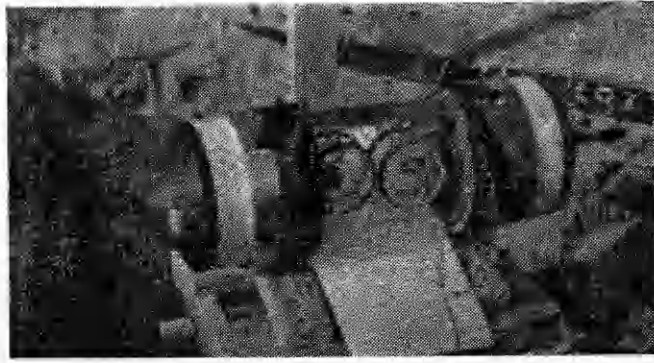
4. Многослойные системы ускорения цилиндрических лайнеров. Для изучения возможностей достижения высоких плотностей энергии используется метод взрывного ускорения металлических лайнеров, а для получения наибольших скоростей — метод промежуточных слоев легкого материала или системы с постепенно уменьшающимся импедансом [20—23]. В Институте им. Калиского такие работы начаты с исследования простейших плоских и осесимметричных систем, для которых теоретические результаты можно сопоставить с измерениями, полученными разнообразными методами [24—28]. Анализировались возможности применения электрических методов с датчиками резистивного, пьезоэлектрического и биметаллического типов. Аналогичному анализу подверглись и оптические методы с различными камерами. Предприняты несколько попыток приспособить методы кумуляции энергии в плоских УВ и методы ускорения металлических лайнеров в многослойных системах, описанные в [23], к цилиндрическому случаю. Рассматривалась возможность высокоскоростного разгона металлического цилиндрического лайнера в системе, представленной на рис. 15 (1 — медный лайнер, 2 — легкий слой). Для нее удалось проделать упрощенную оценку параметров и поставить несколько начальных экспериментов. Оптимальное число слоев в системе определено для простейшей модели упругого соударения и постоянного отношения масс соседних тяжелых лайнеров. При вычислениях использовались так называемые коэффициенты упругости соударения, которые определялись сравнением расчетной в упругой модели и измеряемой скоростей лайнера для одной пары слоев. Более реальные ситуации проанализированы в [30, 31], где приведены численные расчеты для медного лайнера и легких слоев из различных материалов. Результаты расчетов показаны на рис. 16, где 1 — плексиглас, 2 — упругое соударение, 3 — литий, 4 — окись магния, плексиглас, 5 — алюминий, штриховые кривые относятся к плоской системе, штрихпунктирная — к осесимметричной. Установлено, что в реальных условиях ускоряемый лайнер может



Р и с. 11



Р и с. 12



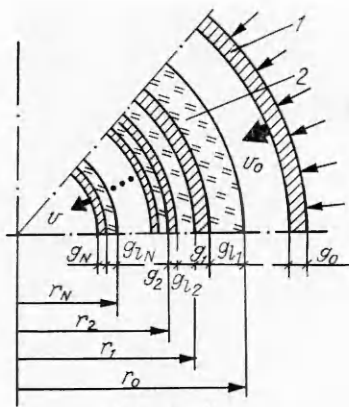
Р и с. 13



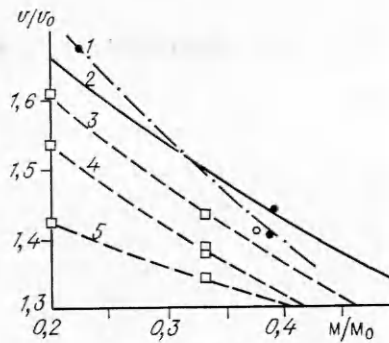
Р и с. 14

приобрести 85—96 % скорости, соответствующей расчетам по модели упругого соударения. Одновременно расчеты показали, что в осесимметричном случае для реальных условий можно достигнуть больших значений скорости, чем в случае упругого соударения и плоской геометрии. На основе проведенного первичного анализа могут быть приняты следующие основные характеристики многослойной цилиндрической системы, способной обеспечить достижение «внутренним» лайнером скорости порядка 15 мм/мкс: шесть пар слоев плексиглас — медь; отношение масс лайнеров $m_6/m_0 = 0,007$; коэффициент упругости соударения $k = 0,95$; отношение толщин медных лайнеров $g_{n+1}/g_n = 0,543$; отношение толщины слоя плексигласа к толщине медного лайнера $g_{in}/g_n = 1,462$; диаметр и толщина первого лайнера из меди $\varnothing = 70$ мм, $g_0 = 2$ мм; диаметр и толщина последнего лайнера из меди $\varnothing_N = 10,4$ мм, $g_N = 0,1$ мм.

Изготовленные в соответствии с приведенными характеристиками взрывные системы подвергнуты экспериментальным испытаниям. Проводились четыре серии опытов для 1, 2, 3 и 6 пар слоев. Цель экспериментов — определение скорости и формы внутренних ускоряемых лайнеров.



Р и с. 15

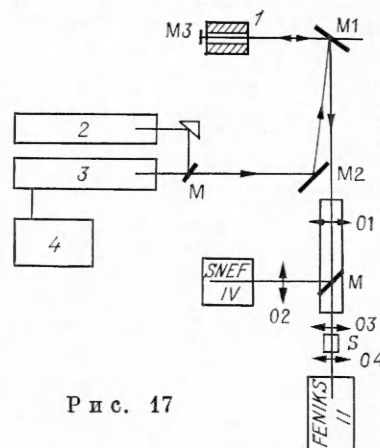


Р и с. 16

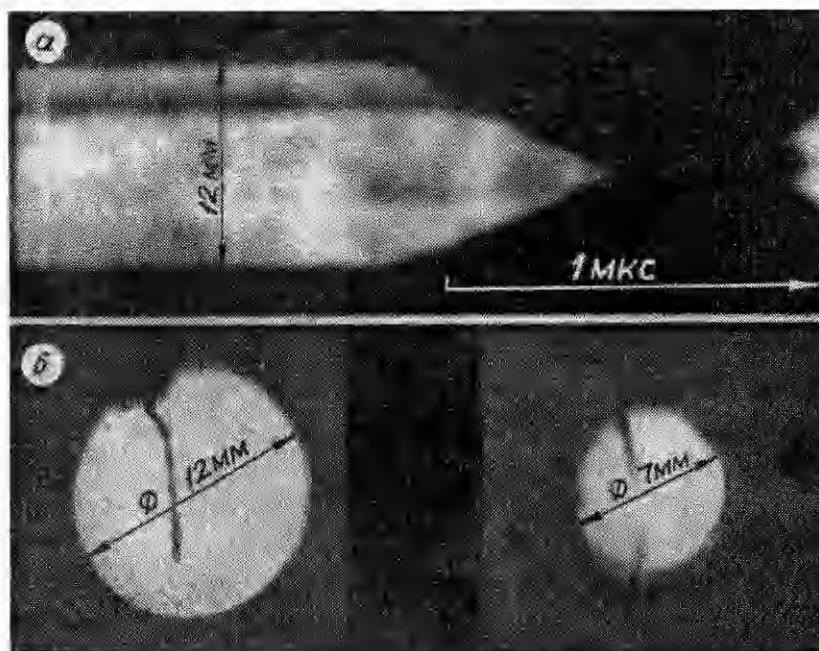
Схема экспериментов и система регистрации приведены на рис. 17, где М — светоделители; М1, М2, М3 — зеркала; SNEF IV — камера покадровой съемки; FENIKS II — щелевая камера, 1 — цилиндрическая многослойная система, 2 — He—Ne-лазер, 3 — лазер на красителе, 4 — система питания. Экспериментальные условия и некоторые характеристики взрывных генераторов подробно описаны в [29]. На рис. 18, а, б показаны зарегистрированное в эксперименте движение ускоряемого лайнера, а также его форма для трехслойной системы пары медь — плексиглас (а — щелевая регистрация движения лайнера камерой FENIKS II, б — покадровая регистрация камерой SNEF IV, время экспозиции кадра 40 нс, начальный диаметр лайнера 13,3 мм, его толщина 0,61 мм). Из эксперимента следует, что лайнер сохраняет симметричную форму и имеет почти постоянную скорость сразу после начала движения. В табл. 2 даны средние величины для всех экспериментов. Наибольшая скорость разгоняемого лайнера $v = 1,4$ см/мкс получена для системы с шестью парами слоев. При начальной скорости $v_0 = 0,382$ см/мкс достигнуто значение скорости $v/v_0 = 3,6 \pm 0,09$. Зарегистрированное увеличение скорости на одну пару слоев уменьшается с ростом количества этих пар. В рассматриваемой системе для последнего эксперимента это увеличение 1,24, а для одной пары 1,46.

Из экспериментов определено значение коэффициента упругости соударения $k = 0,957$. При проектировании системы принималось $k = 0,95$, в то время как из численных расчетов следовало $k = 0,988$. Это свидетельствует о хорошем согласии между оценками k и полученными в эксперименте значениями и о возможности использования на практике применяемой методологии подбора характеристик системы. Отметим, что скорость лайнера в последней ступени разгона оказалась равной $(1,4 \pm 0,1)$ см/мкс, что также совместимо с предварительными оценками.

В исследуемой проблеме кумуляции энергии в цилиндрических системах рассмотрена возможность получения эквивалентных с вышеизложенными результатов в других так называемых цилиндрических многослойных системах с тяжелым концентратором УВ. Схема такого рода дана на рис. 19. В этой системе медный лайнер 4, ускоренный продуктами детонации, соударяется с толстым медным концентратором 3, в котором создается и ускоряется УВ. Импульс нагружения проходит затем через слой легкого материала 2 и ускоряет внутренний лайнер 1 до высокой скорости.



Р и с. 17



Р и с. 18

Численным анализом [32] для такой системы получены следующие параметры: $g_0 = 0,38$ см, $g_{a+b} = 1,08$ см, $g = 0,01$ см и $R_0 = 1,6$ см, скорость лайнера в момент соударения концентратором $0,385$ см/мкс. Анализ проведен на одномерной нестационарной модели с использованием экспериментально-теоретического уравнения состояния [31].

На рис. 20 показана скорость свободной поверхности внутреннего лайнера v_{fs} в зависимости от толщины слоя легкого материала (плексигласа) для различных расстояний между этой поверхностью и осью системы r_{fs} (линии 1—3 соответствуют $r_{fs} = 0,7 \cdot 10^{-3}$; $1,5 \cdot 10^{-3}$; $2,0 \cdot 10^{-3}$ м). Из графиков следует, что скорость лайнера имеет максимум для определенной толщины слоя легкого материала, который отвечает толщине слоя плексигласа около 2 мм при изменении r_{fs} в практически интересных пределах. Для выбранного случая с толщиной слоя легкого материала $g_b = 2,8$ мм на рис. 21 приведено изменение скоростей свободной и внешней v_{es} поверхностей разгоняемого лайнера в зависимости от расстояния до оси системы.

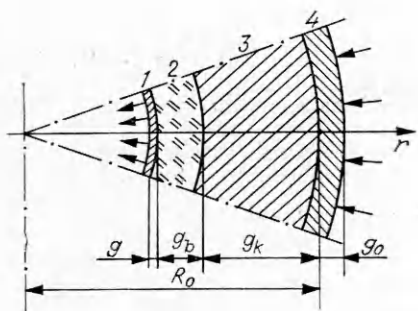
Проведен предварительный эксперимент с системой, показанной на рис. 19. В нем, однако, слой легкого материала не был оптимального размера; толщина его 1 мм и плотность $0,2$ г/см³. В результате эксперимен-

Т а б л и ц а 2

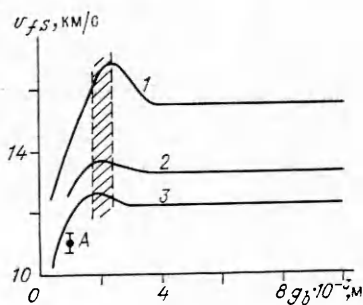
Число пар слоев	Диаметр лайнера / Толщина лайнера	v , см/мкс	$(\frac{v}{v_0})^{1/n}$	$\frac{\sigma_0}{\sigma}$
1	$\frac{26,0}{2,07}$	$0,56 \pm 0,02$	1,46	2,90
2	$\frac{18,5}{1,12}$	$0,69 \pm 0,05$	1,34	2,43
3	$\frac{13,3}{0,61}$	$0,79 \pm 0,05$	1,27	1,82
6	$\frac{10,5}{0,10}$	$1,40 \pm 0,10$	1,24	2,60

та получена средняя скорость $v_l = 1,1$ см/мкс для лайнера толщиной 0,1 мм. Это значение нанесено на диаграмму (рис. 20) точкой А и отвечает результатам численных расчетов [32].

Сравнение характеристик обеих представленных цилиндрических систем говорит об их эквивалентности с точки зрения эффективности, скорости и энергии ускоряе-



Р и с. 19



Р и с. 20

мых лайнеров. Эксперименты также показывают, что скорости медного лайнера порядка 1,4—1,6 см/мкс реалистичны и вполне достижимы в лабораторных условиях.

Основные результаты экспериментов по получению высоких динамических давлений и больших скоростей цилиндрических лайнеров из металла следующие.

1. Давление на фронте сильной маховской волны в конических взрывных системах достигало 3,3—4,6 ТПа. Эти результаты подтверждают сформулированную гипотезу, что в осесимметричных (конических или цилиндрических) системах нерегулярное отражение и интенсивная волна Маха формируются при меньших значениях угла падения, чем в плоских системах.

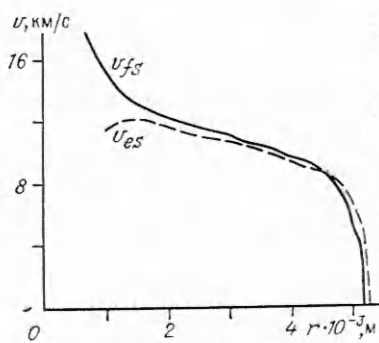
2. Эксперименты показали возможность использования конических и биконических систем для получения высокотемпературной плазмы большой плотности.

3. При изучении взрывных многослойных цилиндрических систем была найдена высокая скорость медного лайнера ($v_l = 1,4$ см/мкс). Исследования этих систем продолжаются. Есть надежда достижения большей скорости в подобных цилиндрических системах.

4. С точки зрения физики высоких плотностей энергии теоретическое и экспериментальное изучение использования энергии взрывчатых веществ очень оправдано, и его надо продолжать. Факт, что при низкой стоимости (дешевый источник энергии) и сравнительно простой технике можно достигнуть сверхвысоких динамических давлений и больших потоков энергии, подтверждает сделанный вывод. Возможно усилить давление почти в 100 раз по сравнению с давлением на фронте детонации, а также создать мощность порядка 10^3 Вт/см², сравнимую с достигнутыми на больших импульсных лазерных системах. В так называемых закрытых системах эти значения могут быть увеличены.

Разработанные и изготовленные малыми сериями системы могут применяться для фундаментальных исследований в плазме и разнообразных явлений в различных материалах при высоких давлениях. Первая задача представляет интерес, пока изучение плазмы оправдано чисто гидродинамическим характером наблюдаемых явлений и относительной простотой интерпретации экспериментальных результатов. Вторая задача связана с тем, что приведенные в настоящей работе взрывные методы могут найти применение в физике твердого тела, там, где в качестве источника энергии используются подземные ядерные взрывы.

Автор благодарен Оргкомитету Вторых Лаврентьевских чтений и руководству Института им. Калуского за предоставленную возможность выступить с данной работой, а также К. Яху, Р. Сверчинскому, Я. Багровскому и Ж. Жиолковскому за помощь при ее выполнении.



Р и с. 21

ЛИТЕРАТУРА

1. Станюкович К. П. Неустановившееся движение сплошной среды.— М.: Наука, 1971.
2. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // УФН.— 1965.— Т. 85, вып. 2.
3. Brun L., Cheret B., Vacellier J. Considérations sur les détonations fortes // Comportement des milieux denses sous hautes pressions dynamiques: Symp. HDP, Paris, 1978.
4. Leygonie J., Bergon J. C. Dispositifs générateurs de hautes pressions dynamiques // Behaviour of dense media under high dynamic pressures: Symp. HDP, Paris, 1967.— N. Y., 1968.
5. Jach K. Propagation of cumulative shock waves in the conical systems: Doctor's Thesis.— Warsaw: Military Acad. Techn., 1977.
6. Derentowicz H., Fruczek M., Kaliski S. et al. Production of super-high loads of matter in conical explosion systems // Proc. VIIth Intern. AIRAPT Conf., Le Creusot, France, 1979.
7. Derentowicz H., Kaliski S., Ziolkowski Z. Generation of fusion neutrons in a deuterium filled cone by means of explosive implosion of polyethylene shell. Pt I. Theoretical estimations // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1977.— V. 18, N 4.
8. Gluchowski W., Kaliski S., Swierczynski B. Optimization of neutron yield in conical system at explosion-induced compression // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1979.— V. 20, N 2.
9. Derentowicz H., Kaliski S. et al. Generation of thermonuclear fusion neutrons by means of a pure explosion. Pt II. Experimental results // Bull. Acad. Polon. Sci. Sér. sci. techn.— 1977.— V. 25, N 10.
10. Derentowicz H., Dybek W., Wrobel J. et al. Experimental investigations of explosive biconical systems: Intern. Report IPPLM N 1/IV (182), 1982 (unpublished).
11. Berezanski K., Burdziakowska E., Derentowicz H. et al. A nanosecond system of initiation of explosive cumulative system for microfusion: Intern. Report IPPLM N 2/81 (62), 1981 (unpublished).
12. Derentowicz H., Kaliski S. An experimental biconical system for explosion microfusion of plasma // Bull. Acad. Polon. Sci. Sér. sci. techn.— 1979.— V. 27, N 2.
13. Derentowicz H., Grygoruk L. et al. Experimental studies on biconical, explosion-driven thermonuclear-fusion system // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1981.— V. 22, N 4.
14. Derentowicz H., Grygoruk L., Jach K. et al. Experimental investigations of high pressure explosive biconical system // Proc. VIIIth Intern. AIRAPT Conf., Uppsala, Sweden, 1981.
15. Kaliski S. Explosion-induced longitudinal-cylindrical compression of plasma // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1979.— V. 20, N 1.
16. Bagrowski J., Derentowicz H., Fruczek M. et al. Explosive microfusion system with a preliminary heating of deuterium: Intern. Report IPPLM N 9/81 (69), 1981 (unpublished).
17. Jach K., Gac K. The influence of radiation transport and heat conduction on the efficiency of the reaction of synthesis in rapid liner D — T core explosive systems for plasma compression // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1984.— V. 25, N 2.
18. Derentowicz H., Gac K. et al. Some possibilities of initiating an avalanche reaction of thermonuclear fusion in spherical explosive systems. Pt I. Single-liner systems // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1984.— V. 25, N 3—4; Pt II. Two-liner systems.— 1985.— V. 26, N 2.
19. Derentowicz H., Dybek W. et al. Generation of strong shock waves in deuterium in the explosive Voitenko generator // J. de Phys. Colloque C8.— 1984.— T. 45, supplément au N 11.
20. Balchan A. S., Cowan G. R. Method for accelerating flat plates to high velocity // Rev. Scient. Instrum.— 1964.— V. 35, N 8.
21. Лаптев В. И., Тришин Ю. А. Увеличение начальной скорости и давления при ударе по неоднородной преграде // ПМТФ.— 1974.— № 6.
22. Fowles G. B., Leung C., Rabie R. Acceleration of flat plates by multiple staging // Proc. VIth AIRAPT Conf., 1977.— N. Y.; L., 1979.— V. 2.
23. Огарков В. А., Пурьгин Н. П., Самылов С. В. Простая модель слоеных систем для получения больших скоростей тел // Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах.— Черноголовка, 1978.
24. Bagrowski J., Derentowicz H. et al. Experimental verification of explosion-induced profiling of a plane shock wave through layer systems // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1977.— V. 18, N 3.
25. Derentowicz H., Ziolkowski Z. Measurement of parameters of convergent cylindrical shock waves by electrical methods in metal samples // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1978.— V. 19, N 2.
26. Bagrowski J. Analysis of characteristics of single stage explosive systems of bodies acceleration to high velocity in a plane symmetry: Intern. Report IPPLM N 6/82 (84), 1982.
27. Bagrowski J., Fruczek M., Grygoruk L. Experimental investigations of explosive driving of cylindrical metal liners in layer systems // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1983.— V. 24, N 9.

28. Adamiec M., Bagrowski J. et al. High-speed photography of explosion processes with the use of a dye laser // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1984.— V. 25, N 3—4.
29. Bagrowski J., Derentowicz H., Luckner H. Experimental investigations of an explosive, cylindrical multilayer system of metal liners accelerated to high velocities // Proc. Xth AIRAPT Conf., Amsterdam, Holland, 1985: Physica.— 1986.— V. 139—140B.
30. Swierczyński R., Tyl J., Wlodarczyk E. Layered single stage driving system for plane liners // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1985.— V. 26, N 2.
31. Swierczyński R., Tyl J., Wlodarczyk E. Analysis of layered concentric liner driving systems // J. Techn. Phys./Polish Acad. Sci.— 1986.— V. 27, N 1—2.
32. Swierczyński R., Tyl J. Analysis of layered concentric liner driving system with heavy concentrator of energy: Intern. Report IPPLM N 1/85 (103), 1985 (unpublished).

Поступила 25/VII 1986 г.

УДК 533.6.011.72

СТРУКТУРА И ЯРКОСТЬ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН В ВОЗДУХЕ Пониженной Плотности

И. В. Немчинов, В. В. Светцов, В. В. Шувалов
(Москва)

Основные представления о квазистационарной структуре интенсивно излучающих ударных волн (УВ), которые даны в [1—3], позволили сделать количественные оценки толщин прогревного слоя и пика за фронтом УВ в приближении серого газа, а также оценить яркость УВ при различных скоростях в воздухе нормальной плотности [3—5]. Численные расчеты нестационарной радиационно-газодинамической задачи о распространении УВ в воздухе со скоростями до 50—70 км/с проведены для плотностей 0,1—0,03 от нормальной [6—9]. Детально учитывался спектр излучения воздушной плазмы (для его описания вводилось до 500 спектральных интервалов), использовались подробные таблицы термодинамических [10] и оптических [11] свойств воздуха. Для уменьшения объема вычислений применялся специальный метод осреднения уравнений переноса излучения [12, 13]. Расчеты позволили определить зависимость яркостной температуры излучения от его длины волны при различных скоростях волны и плотностях воздуха, а также время выхода параметров на их стационарные значения.

Численные расчеты [6—9] подтвердили справедливость основных качественных представлений [1—5], позволили уточнить количественные характеристики излучающих УВ. Однако были обнаружены и новые качественные особенности таких УВ — возникновение двухобластной структуры прогревного слоя перед фронтом волны. Анализ спектров излучения и характера изменения групповых и интегральных (по спектру) односторонних потоков излучения показал, что причиной возникновения двухобластной структуры является различие в поведении коэффициентов поглощения в разных участках спектра при изменении температуры. Падение коэффициента поглощения для фотонов с энергиями 6,5—11 эВ при температурах 0,7—0,9 эВ, связанное с диссоциацией молекул воздуха, приводит к возникновению волны нагрева и просветления. Излучение с большими энергиями квантов, которое способно к фотоионизации, образует горячую область, прилегающую к фронту УВ. Между волной ионизации и диссоциации возникает протяженная, сравнительно холодная зона, существование которой ранее не отмечалось.

Роль радиационных процессов можно охарактеризовать параметром $\chi = q_r/q_h$, где q_r — плотность потока излучения, q_h — гидродинамический поток излучения ($q_h = \frac{1}{2} \rho_0 D_s u_s^2$), ρ_0 — плотность газа перед фронтом УВ, D_s — скорость УВ, u_s — скорость газа за ее фронтом. Если плазма за фронтом УВ оптически толстая и равномерно нагретая, то $q_r = q_b = \sigma T_s^4$ (q_b — поток излучения черного тела при температуре T_s по адиабате Гюгонио, σ — постоянная Стефана — Больцмана). Аппроксимируем уравнение состояния [10] аналитической зависимостью в диапазоне температур 0,8—30 эВ

$$(1) \quad e = 31 T^{1,58} \delta^{-0,12}.$$

Здесь e — величина внутренней энергии единицы массы газа в кДж/г; T — температура в эВ; δ — отношение плотности ρ воздуха к его нор-