

ЛИТЕРАТУРА

1. Аэро Э. Л., Булыгин А. М., Кувшинский Е. В. Асимметричная гидромеханика.— ПММ, 1965, № 2.
2. Дистлер Г. И., Кобзарев С. А. Дальнейшее действие поверхностных сил твердых тел.— В кн.: Исследования в области поверхностных сил. Сб. докл. III конф. по поверхн. сил. М., Наука, 1967.
3. Дерягин Б. В., Федякин Н. Н., Талаев Н. В. О полиморфных модификациях жидкостей при конденсации их паров на гидрофильных поверхностях. Там же.
4. Мецик М. С., Тимощенко Г. Т. Новые данные о теплопроводности тонких пленок воды. Там же.
5. Базарон У. Б., Дерягин Б. В., Булгадаев А. В. Исследование сдвиговой упругости жидкостей в объеме и граничных слоях. Там же.
6. Толстой Н. А., Спартаков А. А., Трусов А. А. Жесткий электрический дипольный момент коллоидных частиц. Там же.
7. Аэро Э. Л., Булыгин А. М. Гидромеханика жидких кристаллов.— Итоги науки и техники. Сер. Гидромеханика. ВИНТИ АН СССР, 1973, т. 7.
8. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. М., Наука, 1975.
9. Дерягин Б. В., Пичугин Е. Ф. Исследования профиля скоростей и вязкости граничных слоев масел методом сдувания.— В кн.: II Всесоюз. конф. по трен. и износу в машинах. Доклады. Т. 1. М.— Л., 1947.
10. Карасев В. В., Дерягин Б. В. Изучение граничной вязкости органических жидкостей методом сдувания.— Коллоидн. журн., 1953, т. 15, № 5.
11. Дерягин Б. В., Карасев В. В. и др. Исследование граничной вязкости полидиметилсилоксановых олигомеров.— В кн.: Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах. М., Наука, 1972.
12. Карасев В. В., Дерягин Б. В. Применение вращательной поляризации к исследованию состояния поляризации отраженного и рассеянного света, в частности, с целью прецизионного измерения толщины тонких пленок.— ДАН СССР, 1978, т. 62.

УДК 533.9.07+535.231.6

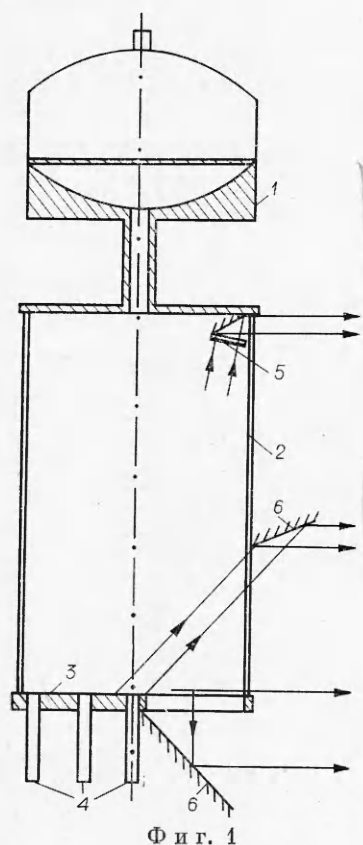
ПАРАМЕТРЫ СТРУИ ВЗРЫВНОГО ГАЗОВОГО КОМПРЕССОРА

Ю. Н. Киселев, К. Л. Самонин, Б. Д. Христофоров
(Москва)

Из взрывных устройств, преобразующих путем кумуляции энергию взрыва в энергию высокоскоростной плазменной струи, наибольшие скорости струи достигаются с помощью взрывного газового компрессора (ВГК) [1, 2]. Большая энергетика плазменной струи ВГК позволяет успешно применять его для создания мощных источников излучения [3, 4], генерации сильных ударных волн [5], термообработки поверхности металлов [6]. Теоретический расчет работы ВГК [7, 8] из-за сложности двумерного течения в камере сжатия и сильного влияния излучения пока является оценочным. А экспериментальные результаты относятся в основном к таким величинам, как максимальная скорость струи и ее полная энергия [9], которые являются недостаточными для расчетов конкретных задач.

В данной работе исследовалось распределение удельной энергии и плотности по длине струи ВГК, а также излучение, испускаемое при торможении струи на преграде. Использовался ВГК, имеющий камеру сжатия в виде сферического сегмента с радиусом кривизны 80 мм и диаметром основания 96 мм. Ударник в виде пластины из алюминия толщиной 2 мм метался зарядом из пресованного до плотности 1,71 г/см³ гексогена с полной энергией 4,27 МДж.

Первоначально по методике, предложенной в работе [9], была определена полная энергия плазменной струи, которая для случая заполнения камеры сжатия ВГК воздухом нормальной плотности равнялась 57 кДж, т. е. составляла 1,3% от энергии взрыва. Средняя скорость ударной волны, генерируемой плазменной струей в трубке диаметром 8 мм, измеренная ионизационными датчиками на базе 75 мм, равнялась 31 км/с.



Фиг. 1

Распределение параметров по длине струи определялось при ударе струи о преграду 3. Схема опытов представлена на фиг. 1. Плазменная струя от ВГК 1, прорвав тонкую лавсановую диафрагму, через трубку диаметром 10 мм и длиной 40 мм вылетала в вакуумированную до 0,1 Па стеклянную колбу 2 и тормозилась на ее дне. В опытах измерялись массовая скорость струи на границе заторможенной области, ее высота, давление на преграде, а также яркостные температуры заторможенной области в направлении, параллельном преграде и под углом 45° к ней, и потоки излучения с поверхности заторможенной области.

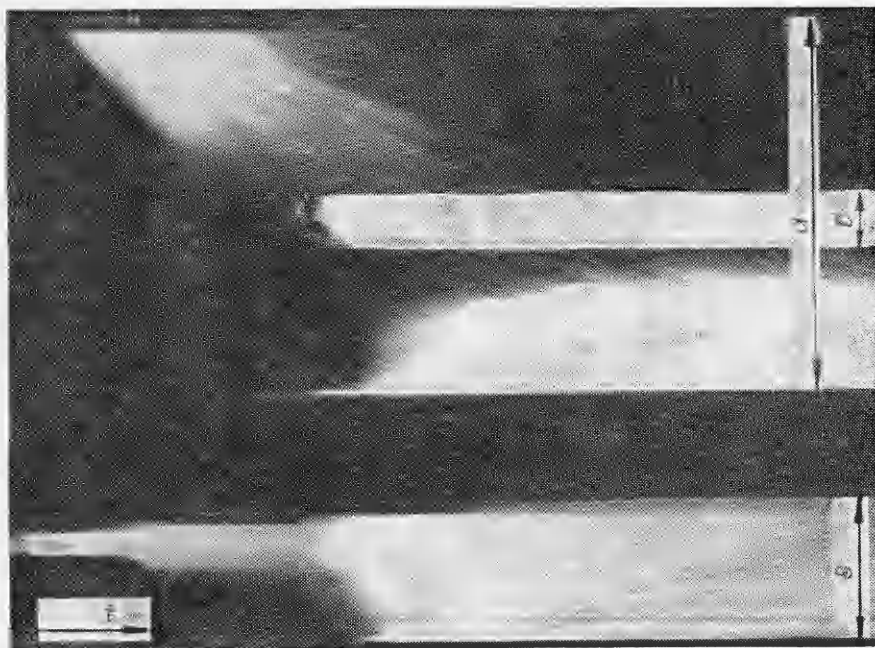
Разлет и торможение плазменной струи регистрировались щелевым фоторегистратором СФР-2М. Типичная фоторегистрограмма приведена на фиг. 2. Съемка велась за фиолетовым фильтром с эффективной длиной волны 432 нм и полушириной 20 нм. Наблюдение велось через боковую поверхность стеклянной колбы а, а также через зеркало б под углом 45° к преграде в. Яркостные температуры определялись путем фотометрического сравнения яркостей исследуемого объекта и эталонного источника ЭВ-45 [5]. При щелевой фоторазвертке разлета плазменной струи в вакуум регистрировались флуктуации яр-

кости в струе, движущиеся с постоянной скоростью (см. фиг. 2). Считая, что эти флуктуации движутся с массовыми скоростями, по наклону их изображения на фоторазвертке определялась массовая скорость в момент прохода через фронт отраженной ударной волны.

Давление на преграде измерялось с помощью трех пьезодатчиков 4, расположенных на разных расстояниях от центра преграды. Перед опытом датчики калибровались воздушной ударной волной с давлением 10 МПа. Временное разрешение пьезодатчиков составляло 0,3 мкс.

По результатам измерения давления p на преграде, скоростей струи V и фронта отраженной волны D определена плотность в набегающей струе из соотношения $\rho = p/V(V + D)$. Точность такого метода тем выше, чем более квазистационарным является процесс отражения. Перепады давления в ударно-сжатом слое из-за разлета паров преграды, согласно расчетам [10], незначительны. Аналогия с сильным плоским взрывом показывает, что при набегании струи с резкими перепадами скорости и плотности давление на преграде не менее 40% от фронтального.

Измерение потоков излучения, испускаемых заторможенной областью, проводилось с помощью контрольной стеклянной пластинки 5 с нанесенными на ее поверхность полосками алюминия известной толщины. Под действием мощного излучения происходит испарение и нагрев паров алюминия, при этом они становятся прозрачными в видимой области спектра. Исходя из экспериментальной зависимости такого «прогорания» алюминия от падающей энергии излучения [4] и считая, что излучателем является равнояркий диск, по времени «прогорания» и местоположению пластинки относительно излучателя определялись средние за время прогорания одной полоски алюминия потоки излучения с поверхности заторможенной области.

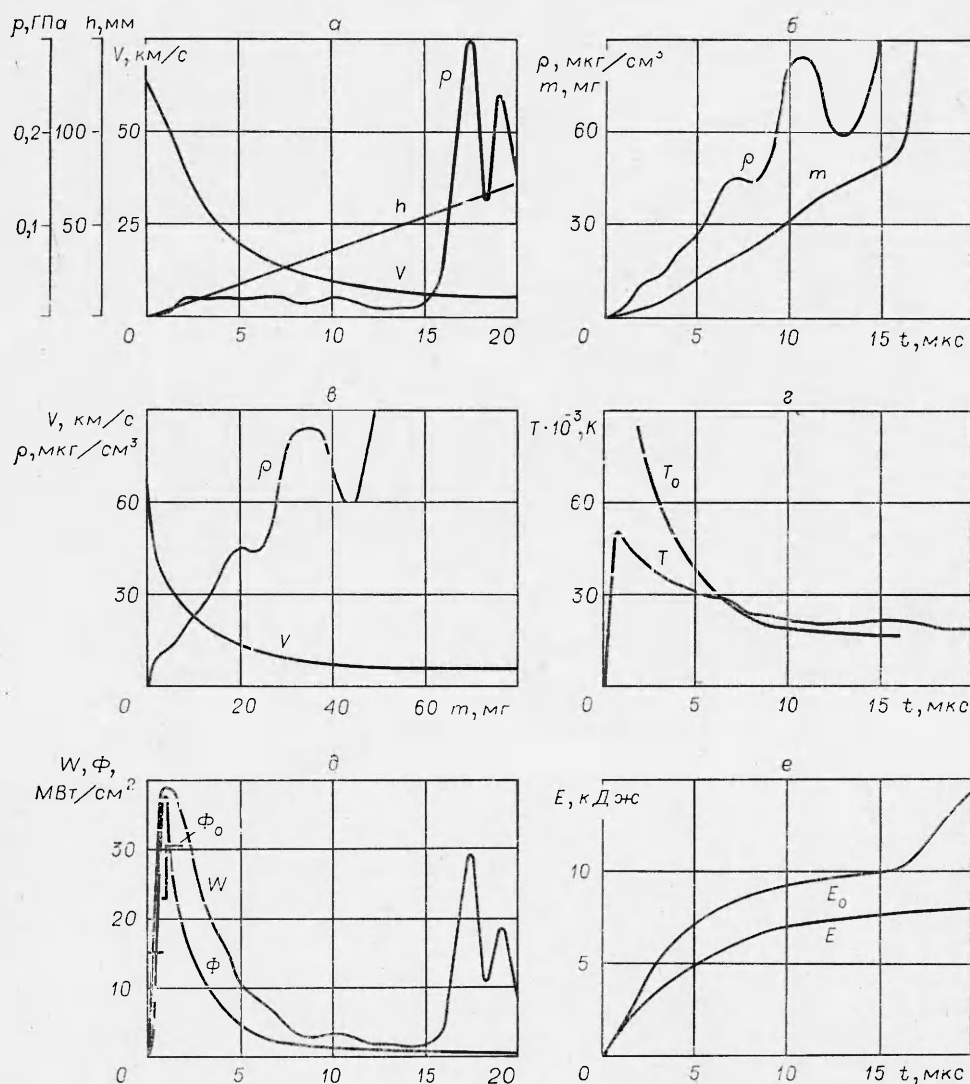


Ф и г. 2

В первом опыте в камере сжатия ВГК первоначально находилось 0,077 г воздуха нормальной плотности. Струя вылетала в вакуумированный объем диаметром 90 мм и длиной 156 мм. На фиг. 3, а представлены в зависимости от времени значения массовой скорости в струе, давления на преграде, h — высоты отхода от преграды ударной волны. Скорость передней части струи достигала в осевом направлении 64 км/с, а в радиальном — 20 км/с. Скорость отраженной ударной волны имела максимальное значение 5,5 км/с в момент времени 2 мкс после удара струи о преграду и в дальнейшем падала до 3,5 км/с. Все три пьезодатчика показали одинаковое давление. Оно достигало 0,022 ГПа при $t = 2$ мкс, плавно уменьшалось до 0,005 ГПа при $t = 14$ мкс и затем резко возрастало до 0,3 ГПа.

При расчете плотности в набегающей струе учитывался сдвиг во времени между изменением давления на фронте ударной волны и давлением на преграде, измеряемом в опыте, путем сдвига значения давления на время прохода звуковой волны по толщине заторможенной области. Скорость звука в заторможенной области бралась из таблиц работы [11]. Ввиду плавного изменения давления за максимумом гидродинамического потока этот учет дает поправку к плотности не более 20%. Рассчитанная таким образом плотность в струе перед фронтом ударной волны и масса ($m = S \int \rho V dt$, S — площадь преграды), поступившая в заторможенную область, представлены на фиг. 3, б. Видно, что плотность в струе со временем возрастает, а масса к 16 мкс сравнивается с массой газа, первоначально находившейся в камере сжатия ВГК, и в дальнейшем резко увеличивается. Это позволяет предположить, что начиная с этого момента времени приходит плотная часть струи, движущаяся со скоростью 5—6 км/с, в основном состоящая из материала стенок камеры сжатия ВГК (в нашем случае алюминия).

Из представленного на фиг. 3, в распределения по массе струи ее скорости и плотности видно, что ВГК разгоняет до скорости свыше 10 км/с



Фиг. 3

половину начальной массы газа. В самой высокоскоростной струе существует сильный градиент удельной энергии по массе. Удельной энергией 1—2 МДж/г обладает масса менее 0,002 г, т. е. около 2,5% от начальной массы газа. Высокоскоростная часть струи обладает энергией 9,1 кДж, что составляет 16% от полной энергии струи. Остальная энергия принадлежит плотной, низкоскоростной части струи.

Резкий спад удельной энергии по длине струи сказывается и на излучательных свойствах заторможенной области. На фиг. 3, г представлена температура T_0 , которая должна быть в заторможенной области по ударной адиабате воздуха [11], исходя из измеренной плотности и массовой скорости струи. Яркостная температура T , измеренная под углом 45° к поверхности преграды, до момента времени 6 мкс лежит ниже, а в дальнейшем совпадает с температурой по ударной адиабате. Еще ниже лежат значения яркостной температуры, измеренной в направлении, параллельном преграде, что можно объяснить непосредственным контактом горячей плазмы со стеклянной стенкой в этом направлении. На фиг. 3, д

даны потоки излучения Φ с поверхности заторможенной области, определенные с помощью контрольной пластинки, а также потоки излучения Φ_0 , рассчитанные по измерениям яркостной температуры в предположении абсолютно черного тела, и гидродинамический поток энергии $W = 0,5\varphi V^3$, поступающий в заторможенную область. Близость измеренных и рассчитанных потоков излучения говорит об оптической черноте излучателя. Гидродинамический поток энергии достигает максимума 39 МВт/см^2 через $1,5 \text{ мкс}$ после удара струи о преграду. Максимальный поток излучения, измеренный контрольной пластинкой, составляет 31 МВт/см^2 , т. е. значительную часть энергии струи излучателя. Это, а также резкий спад гидродинамического потока не позволяют зарегистрировать высокие яркостные температуры.

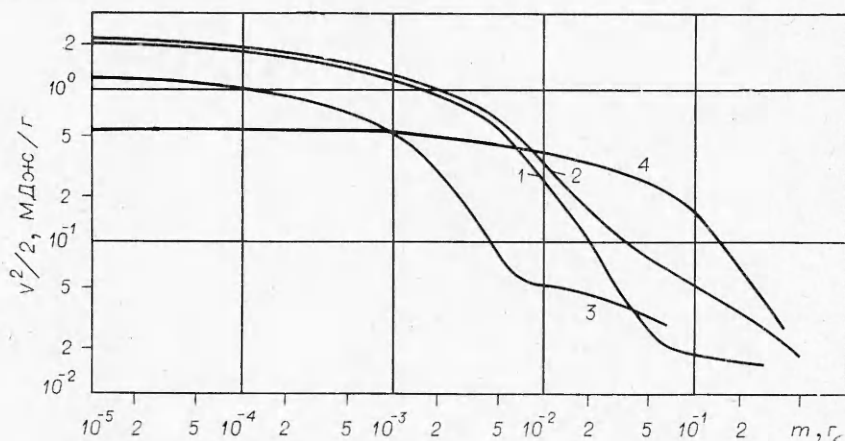
В предположении абсолютно черного излучателя по измеренному распределению яркостной температуры по излучающей поверхности была рассчитана энергия E , излучаемая заторможенной областью, которая представлена на фиг. 3, *е*. Считалось, что излучателем является поверхность цилиндра без учета поверхности преграды. На фиг. 3, *е* приведена и гидродинамическая энергия E_0 , выделяющаяся в заторможенной области. При торможении высокоскоростной части струи происходит эффективное преобразование гидродинамической энергии. С приходом плотной низкоскоростной части струи эффективность такого преобразования уменьшается.

Для определения возможности повышения эффективности работы ВГК были проведены опыты с наполнением камеры сжатия неоном и ксеноном при нормальном давлении, а также воздухом при давлении $1,16 \text{ МПа}$. Результаты всех опытов представлены в таблице, где m_0 — начальная масса газа в камере сжатия, m_* — масса струи, имеющая скорость $\geq 10 \text{ км/с}$, E_{0*} — гидродинамическая энергия, принадлежащая массе m_* , E_* — излученная энергия за время выделения E_{0*} , T_m — максимальная яркостная температура, W_m — максимальный гидродинамический поток, Φ_{0m} — максимальный измеренный поток излучения. На фиг. 4 даны также распределения удельной энергии $0,5 V^2$ по массе струи при различном заполнении камеры сжатия. Номера зависимостей соответствуют нумерации опытов в таблице.

Опыты показали, что не только плотность, но и вид газа существенно влияет на работу ВГК. При заполнении ВГК неоном, который близок по плотности к воздуху, распределение удельной энергии по массе струи близко к результатам первого опыта для массы струи менее $0,015 \text{ г}$. Остальная масса струи летит со значительно большими скоростями, чем при заполнении ВГК воздухом нормальной плотности, что приводит к соотношению $m_*/m_0 = 2$, т. е. в этом случае струя сильно «загрязнена» продуктами испарения стенок ВГК под действием мощного коротковолнового излучения, для которого холодный неон прозрачен. Сравнительно малый выход излучения в этом опыте может быть объяснен сильной экранировкой излучения этими примесями.

Увеличение плотности путем заполнения камеры сжатия ВГК ксеноном привело к существенному уменьшению эффективности работы

Номер опыта	Газ	m_0 , г	m_* , г	E_{0*} , кДж	E_* , кДж	$T_m \times 10^{-3}$, К	W_m , МВт/см ²	Φ_{0m} , МВт/см ²
1	Воздух	0,077	0,032	9,1	7,0	50	39	31
2	Ne	0,053	0,10	14	5,2	39	36	17
3	Xe	0,35	0,017	2,0	1,2	28	1,9	—
4	Воздух	0,78	0,26	40	26	38	19	8,4



Ф и г. 4

ВГК — энергия высокоскоростной части струи составила всего 2 кДж, и до скорости свыше 10 км/с разгоняется только 5% первоначальной массы ксенона. Это связано, вероятно, с более сильным разогревом ксенона при ударном сжатии в ВГК. При этом поступление испарившейся со стенок массы становится настолько сильным, что ударник останавливается, не дойдя до вершины камеры сжатия. Это подтверждает также тот факт, что при увеличении массы ксенона в два раза путем увеличения объема камеры сжатия при добавлении к ней цилиндрической части скорость образующейся струи не превышает 10 км/с.

Увеличение плотности воздуха в камере сжатия путем повышения давления значительно выравнивает распределение скорости по массе струи, но при снижении максимальной скорости до 32 км/с. При этом энергия высокоскоростной части струи увеличивается в 4,4 раза по сравнению с заполнением воздухом нормальной плотности. В этом опыте для приближения плотности струи к плотности, реализуемой в первом опыте, плазменная струя расширялась в колбе большего размера — диаметром 142 мм и длиной 438 мм. Выход излучения достиг 26 кДж за время 30 мкс.

Максимальный поток излучения 31 МВт/см² измерен в первом опыте. При этом температура по ударной адиабате значительно превышает измеренную. Поэтому, увеличив гидродинамический поток за счет уменьшения разлета струи в бок, можно существенно увеличить и потоки излучения из заторможенной области. Это следует и из результатов численного расчета задачи об ударе струи алюминиевых паров различной плотности [10], которые могут быть использованы для приближенных оценок и для воздуха в силу близости средних пробегов излучения и молекулярных весов.

Учитывая вышесказанное, можно отметить, что в данной работе предложен и испытан метод определения плотности в высокоскоростной струе по измерению массовой скорости и давления на преграде, возникающего при торможении струи.

Получены распределения удельной энергии по массе струи ВГК при заполнении камеры сжатия различными газами. Отмечен сильный рост плотности при резком снижении удельной энергии в распределении по массе струи ВГК.

Показано, что не только плотность, но и вид газа существенно влияет на работу ВГК. Увеличение плотности в камере сжатия путем повышения давления воздуха значительно повышает эффективность работы ВГК за счет выравнивания распределения скорости по массе струи. Но при этом происходит снижение максимальной скорости струи.

По результатам измерений оценен выход излучения, испускаемого при торможении струи на преграде. Показано, что при торможении струи, движущейся со скоростями более 10 км/с, происходит эффективное преобразование в энергию излучения гидродинамической энергии струи. Коэффициент такого преобразования может достигать 0,6—0,7.

Авторы выражают свою признательность И. В. Немчинову за постоянный интерес к данной работе и полезное обсуждение результатов.

Поступила 16 IV 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Войтенко А. Е. Получение газовых струй большой скорости.— ДАН СССР, 1964, т. 158, № 6.
2. Войтенко А. Е. Ускорение газа при его сжатии в условиях остроугольной геометрии.— ПМТФ, 1966, № 4.
3. Войтенко А. Е., Маточкин Е. П., Федулов А. Ф. Взрывная лампа.— ПТЭ, 1970, № 2.
4. Киселев Ю. Н., Христофоров Б. Д., Цикулин М. А. Экспериментальное исследование воздействия на преграду источников мощного излучения сплошного спектра.— В сб.: Низкотемпературная плазма в космосе и на Земле. М., ВАГО, 1977.
5. Цикулин М. А., Попов Е. Г. Излучательные свойства ударных волн в газах. М., Наука, 1977.
6. Кирко В. И. Воздействие высокоэнтальпийной плазмы, полученной с помощью взрывного источника, на внутреннюю поверхность полости и канала.— ФГВ, 1978, т. 14, № 6.
7. Crowley V. K., Glenn H. D. Numerical simulation of a high energy (Mach 120 to 40) air shock experiment.— In: Proc. 7th Int. Shock Tube Symp. Toronto, Univ. Toronto Press, 1970.
8. Романов Г. С., Урбан В. В. Численное моделирование взрывного плазменного генератора в газодинамическом приближении.— ИФЖ, 1979, т. 37, № 5.
9. Войтенко А. Е., Кирко В. И. Коэффициент полезного действия взрывного плазменного компрессора.— ФГВ, 1975, т. 11, № 6.
10. Бергельсон В. И., Немчинов И. В. Об излучении, возникающем при ударе о преграду слоя газа с очень большими скоростями.— ПМТФ, 1978, № 6.
11. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М., Машиностроение, 1965.

УДК 533.9:533.952.16

ВОЗМОЖНОСТИ ВЗРЫВНОГО МГД-ГЕНЕРАТОРА КАК ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА

Ю. А. Буренин, Г. А. Швецов

(Новосибирск)

Плазменный фокус является в настоящее время одним из самых мощных источников нейтронного и рентгеновского излучения.

Анализ экспериментальных результатов показывает, что выход нейтронов $N \sim E_0^\alpha \sim I^\beta$, где E_0, I — энергия и ток разряда [1, 2], $1,5 \leq \alpha \leq 2,5$, $\beta \sim 3,3$. Эксперименты проводились в основном с конденсаторными батареями с энергией до 400 кДж. В мегаджоульном диапазоне в качестве источников начальной энергии перспективно применение взрывных МГД-генераторов, позволяющих получать в нагрузке ток и энергию, в 10—50 раз превышающие их начальные значения [3].

Об исследованиях по электротехническому согласованию конкретного взрывомагнитного генератора с плазменным фокусом (ВГ-ПФ) сообщалось в докладе [4]. Однако рассмотренный взрывомагнитный генератор с малой индуктивностью (400 см) и большим временем работы