

А. М. Семенов

ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНЫХ ДАВЛЕНИЙ

Разработана конструкция лабораторной модели генератора импульсных давлений на основе электрического разряда импульсного плазменного ускорителя в воздухе нормальной плотности. Исследовано пространственно-временное распределение динамического давления плазменного потока.

Исследование и разработка новых способов создания высоких импульсных давлений представляют интерес для решения широкого круга научных и прикладных задач. К ним относятся изучение термодинамических и оптических свойств плазмы при высоких плотностях и температурах, прочностных характеристик материалов, разработка новых технологических процессов, создание эталонных источников давления и т. п.

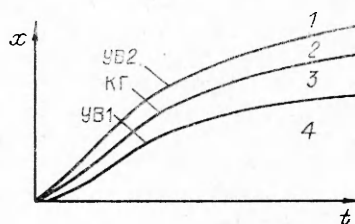
В современной технике получения высоких импульсных давлений широко применяются методы, основанные на использовании ударных труб и взрывчатых веществ (ВВ). Установки типа ударной трубы, как правило, требуют достаточно большого аппаратного обеспечения и сложны в эксплуатации; применение ВВ возможно только в специально оборудованных взрывных камерах. Эти эксперименты носят одноразовый характер, что обуславливает трудности с организацией импульсно-перiodической работы, необходимой для ряда существующих приложений.

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования динамических характеристик лабораторной модели плазмодинамического генератора импульсных давлений, работающего в воздухе нормальной плотности.

Генератор импульсных давлений — одна из разновидностей плазменных ускорителей, работающих в газе высокой плотности в режиме генерации высокоскоростных плазменных потоков. В таком устройстве плазменный поток ускоряется электромагнитными силами при взаимодействии разрядного тока с собственным азимутальным магнитным полем [1].

Физические особенности генерации импульсных давлений основаны на торможении высокоскоростного потока эрозионной плазмы на газе высокой плотности как на подвижной деформируемой преграде, приводящем к образованию газодинамической структуры течения (рис. 1) [2]. Область ударно-сжатой плазмы ограничена ударной волной УВ1 и контактной границей КГ, которая перемещается под действием скоростного напора плазменного потока со скоростью, значительно превосходящей скорость звука в невозмущенном газе. Ударно-сжатая плазма выполняет по отношению к невозмущенному газу роль поршня, возбуждая в нем ударную волну УВ2. За поршнем создается область пониженной плотности газа. По мере развития разряда увеличивается масса газа, охватываемого ударной волной. Происходит наряду с ускорением плазмы в осевом направлении ее схлопывание и кумуляция в радиальном [3]. В результате на выходе генератора формируется газодинамическая структура течения, показанная на рис. 2. Термодинамические и газодинамические параметры характерных зон 4, 5, 8 течения можно оценить, пользуясь зависимостями, приведенными в [2, 4].

Рис. 1. $x-t$ диаграмма взаимодействия плазменного потока с газом высокой плотности. 1 — невозмущенный газ; 2 — ударно-сжатый газ; 3 — ударно-сжатая плазма; 4 — плазменный поток.



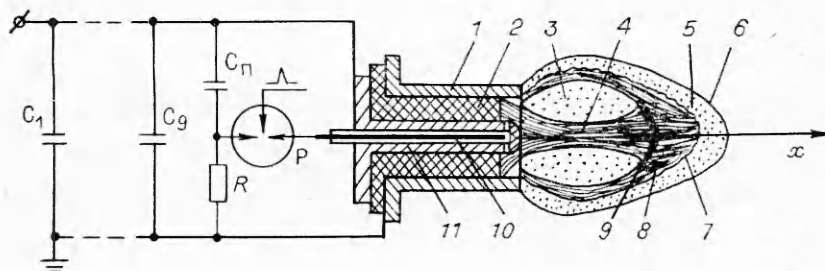


Рис. 2. Газодинамическая структура характерных зон плазменного потока и конструктивный эскиз генератора.

1 — анод; 2 — разделительная диэлектрическая втулка; 3 — область пониженной плотности газа; 4 — высокоскоростной поток эрозионной плазмы; 5 — ударно-сжатый газ; 6 — УВ в газе; 7 — контактная граница; 8 — ударно-сжатая плазма; 9 — УВ в плазме; 10 — электрод поджига разряда; 11 — катод. C_1 — C_g — емкостный накопитель; C_p — конденсатор поджига; R — разрядник.

Конструктивно плазмодинамический генератор выполнен (см. рис. 2) в виде системы коаксиальных цилиндрических электродов, разделенных диэлектрической втулкой из фторопласта ФТ-4 [5]. Характерные размеры электродной системы генератора в описываемых экспериментах: диаметр внутреннего электрода 10, наружного 40 мм, расстояние от диэлектрической втулки до среза ускорителя 5 мм. Электроды генератора выполнены из нержавеющей стали с вольфрамовыми насадками (для увеличения ресурса работы установки).

Разряд инициировали встроенной в центральный электрод маломощной пушкой с четырьмя каналами, расположенными под прямым углом. Через каналы инжестировалась плазма по поверхности диэлектрической втулки в межэлектродный зазор ускорителя. Источником питания плазмодинамического генератора служила малоиндуктивная конденсаторная батарея с максимальным зарядным напряжением $U = 5$ кВ и общей емкостью $C = 900$ мкФ. Пушка запитывалась от дополнительного конденсатора емкостью $C_p = 4$ мкФ. Емкостный накопитель и конденсатор поджигания включались параллельно через сопротивление $R = 10$ МОм и заряжались одновременно одним высоковольтным выпрямителем. Коммутация цепи пушки осуществлялась через управляемый воздушный разрядник подачи высоковольтного (~ 20 кВ) импульса инициирования.

При работе в импульсно-периодическом режиме инициирующий импульс не подавался, а в зависимости от зарядного напряжения регулировался межэлектродный зазор разрядника, при котором он срабатывал. Система устойчиво функционировала в диапазоне начальных напряжений $U = 3 \div 5$ кВ и энергий накопителя $W = 4 \div 11$ кДж. Ресурс установки при максимальных энергетических режимах составлял 10^3 импульсов и определялся эрозионной стойкостью центрального электрода.

Пространственное распределение динамического давления (напора) плазменного потока изучали с помощью датчиков давления на основе пьезокерамики ЦТС-19, подобных описанным в [6]. Методы экранировки датчиков аналогичны [6, 7]. Временное разрешение и чувствительность датчиков составляли $\tau \approx 1$ мкс и $\mu \approx (7,5 \div 8) \cdot 10^6$ (Н/м²)/В. Одновременно с пьезоэлектрическими измерениями по стандартной методике [8] исследовали электротехнические характеристики разряда (ток и напряжение на электродах ускорителя) и определяли их корреляцию с динамическими характеристиками потока.

Согласно электротехническим измерениям, в рассмотренном диапазоне изменения энергетических режимов работы генератора ($W = 4 \div 11$ кДж) ток разряда изменялся: $I = 300 \div 450$ кА, электрическая мощность $P = (0,3 \div 0,5) \cdot 10^9$ Вт. Разряд носил аperiodический характер с сильным затуханием, длительность первого полупериода токового импульса $\tau_{1/2} = 25$ мкс, максимальное значение тока достигалось через ~ 8 мкс от начала разряда.

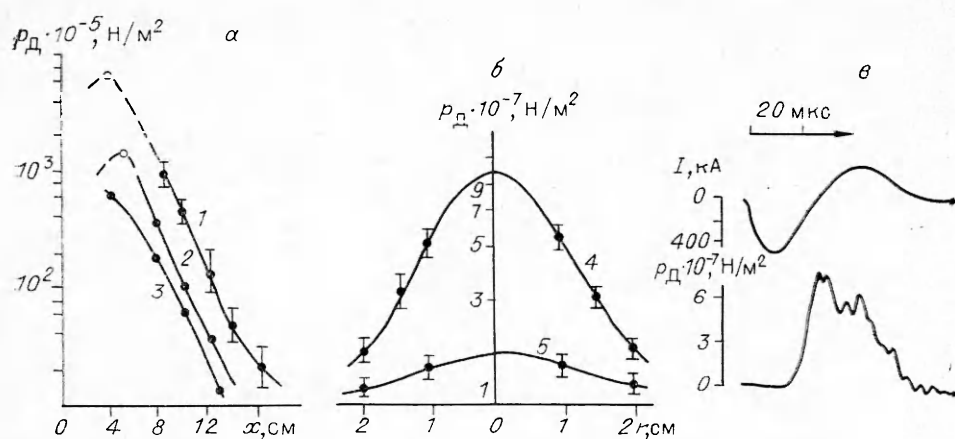


Рис. 3. Зависимость максимального динамического давления плазменного потока от расстояния до среза генератора (а), его радиальное распределение в сечениях, перпендикулярных оси потока (б), и характерные осциллограммы тока и сигнала с датчика давления (в).

W , кДж: 1 — 11, 2 — 7,2, 3 — 4; x , мм: 4 — 80, 5 — 120.

Результаты измерения распределения максимальной амплитуды сигнала с датчика (максимального динамического давления плазменного потока) при установке его вдоль оси потока на различных расстояниях от среза ускорителя, а также в сечениях, перпендикулярных оси, и характерные осциллограммы импульсов давления и тока разряда представлены на рис. 3.

Во всех случаях импульс давления имел крутой передний фронт с нарастанием $dp_d/dt \sim 10^{12} \div 10^{13}$ $\text{H}/(\text{m}^2 \cdot \text{c})$. При фиксированном расположении датчика пульсации максимального сигнала при одном и том же энергетическом режиме генератора составляли 5—10% и обуславливались неустойчивостью фронта течения плазмы из-за развития гидродинамической неустойчивости на контактной границе плазма — газ [9]. На спаде импульса пульсации давления были вызваны повторным энерговыделением во втором полупериоде разряда, ускорением плазмы и образованием структуры течения, аналогично показанной на рис. 1.

Максимальная амплитуда скоростного напора достигалась на расстоянии $x \approx 60$ мм от среза генератора и составляла $p_d \sim 10^8$ H/M^2 . При установке датчика на меньшем расстоянии происходило его разрушение, так как величина импульсных нагрузок имела тот же порядок, что и предел разрушения пьезокерамики ЦТС-19 [10]. Для этого случая оценка максимального динамического давления потока проведена, исходя из результатов численных расчетов ударно-волновой структуры течения [11],

$$p_d = 2,07 P_{\text{max}}^{0,8}, \quad \text{H}/\text{M}^2, \quad (1)$$

где P выражено в ваттах.

При мощности энерговыклада $P_{\text{max}} = 0,5 \cdot 10^9$ Вт максимальное динамическое давление потока составляет $7,5 \cdot 10^8$ H/M^2 и достигается в момент максимума вкладываемой в разряд электрической мощности (максимума разрядного тока), что соответствует отходу плазмы от среза генератора на расстояние $x_1 = 40$ мм для режима $W = 11$ кДж и $x_2 = 60$ мм для $W = 7$ кДж. На рис. 3, а эти значения отмечены точками и продолжены в область $p_d > 10^8$ H/M^2 штриховой линией.

При изменении энергетического режима генератора $p_d \sim W^{0,8 \pm 0,1}$, что находится в соответствии с [11], а амплитуда сигнала давления резко падала в осевом направлении при удалении датчика давления от среза генератора (см. рис. 3, а). В сечении, перпендикулярном оси генератора, на расстоянии $x \approx 2R_a$ (где R_a — радиус анода), динамическое давление менялось незначительно, что связано с наличием в потоке пробки ударно-сжатой плазмы, и выравнивалось по сечению к концу разряда из-за

уменьшения скорости и, следовательно, скоростного напора потока (см. рис. 3, б).

Экспериментальное значение максимального динамического давления потока находится в хорошем соответствии с оценками, которые можно получить из общих физических представлений о структуре течения. Согласно схеме процесса взаимодействия (см. рис. 1),

$$p_d \approx p_1 + p_2,$$

$$p_1 = \rho_1 v_1^2, \quad p_2 = \rho_2 v_2^2,$$

где индексы 1 и 2 относятся к параметрам ударно-сжатых плазмы и газа соответственно. Из условия непрерывности скорости на КГ плазмы $v_{\text{КГ}} = v_1 = v_2$. С учетом [11] следует, что $p_1/p_2 \approx 1/10$, и тогда

$$p_d \approx p_1 + p_2 = \frac{11}{10} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \rho_0 v_{\text{КГ}}^2, \quad (2)$$

где γ — показатель адиабаты воздуха; ρ_0 — плотность воздуха при атмосферном давлении. Здесь, согласно [12], $\rho_2 = (\gamma + 1)/(\gamma - 1) \cdot \rho_0$.

Оценка по соотношению (2) максимального динамического давления в потоке для характерных начальных условий эксперимента ($v_{\text{КГ}} = 7 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_0 = 1,29$ кг/м³, $\gamma = 1,2$) дает $p_d \approx 7,8 \cdot 10^8$ Н/м².

Таким образом, плазмодинамический генератор служит достаточно эффективным устройством для получения сильных импульсных давлений. Благодаря своим технологическим свойствам (работа в частотном режиме, большой ресурс, простота конструкции и обслуживания) он является выгодной альтернативой существующим способам создания импульсных давлений и может быть использован для решения самых разнообразных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин С. Д., Лесков Л. В., Козлов Н. П. Электрические ракетные двигатели.— М.: Машиностроение, 1982.— 272 с.
2. Камруков А. С., Козлов Н. М., Протасов Ю. С. и др. О возможности создания высокояркостных источников излучения на основе ударного торможения гиперзвуковых плазменных потоков в плотных газах // ЖТФ.— 1982.— 52. № 11.— С. 2314—2317.
3. Камруков А. С., Козлов Н. П., Кондратенко М. М. и др. Плазмодинамический источник излучения с взрывным магнитогиродинамическим генератором энергии.— М., 1983.— (Препр./АН СССР. ПЭТ; № 3—110).
4. Камруков А. С., Козлов Н. П., Протасов Ю. С. Физические принципы плазмодинамических сверхточечных излучающих систем // Плазменные ускорители и ионные инжекторы.— М.: Наука, 1984.— С. 5—49.
5. Семенов А. М. Возможности использования МПК-разрядов для генерации сильных ударных волн // Тез. докл. 1-го Всесоюз. симп. по радиационной плазмодинамике.— М.: Энергоиздат, 1989.— Ч. 1.— С. 80—81.
6. Керкис А. Ю., Фомичев В. П. Пьезоэлектрический датчик для измерения давления в импульсных электроразрядных установках // Вопросы газодинамики.— Новосибирск: ИТПМ, 1975.— Вып. 5.— С. 299—302.
7. Кутырев М. В., Семенов А. М. Использование генератора ударных волн на основе МПК-разряда в газе для калибровки датчиков давления // Тез. докл. 1-го Всесоюз. симп. по радиационной плазмодинамике.— М.: Энергоатомиздат, 1989.— Ч. 2.— С. 35—36.
8. Окунь Н. З. Измерение разрядных токов с помощью поясов Роговского // ПТЭ.— 1968.— № 6.— С. 120—129.
9. Баркгоф Г. Неустойчивость Рэлея — Тейлора и Кельвина — Гельмгольца // Гидродинамическая неустойчивость/Под ред. Г. Баркгофа.— М.: Мир, 1964.— С. 372—391.
10. Таблицы физических величин: Справочник/Под общ. ред. И. К. Кикоина.— М.: Атомиздат, 1976.— 1008 с.
11. Камруков А. С., Козлов Н. П., Протасов Ю. С. О критериях подобия ударно-волновых структур плазмодинамических разрядов МПК в газах // ПМТФ.— 1984.— № 2.— С. 3—9.
12. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1966.— 686 с.

г. Тамбов

Поступила в редакцию 1/XI 1990,
после доработки — 29/VII 1991