

$$(\Delta t)_2 \frac{(1 - a^2) \cdot (6 - a^2)}{2 - a^2}. \quad (16)$$

Здесь  $t = z/\xi$ . Из сказанного выше в этом разделе следует, что упомянутая в [5] и описанная там качественно лишь для величины  $\Phi$  структура, состоящая из двух областей осцилляций, неустойчива по отношению к начальным условиям. При  $0 < a < 1/2$  имеется особенность, связанная со скачком аналога гидродинамической скорости  $u$ .

#### Список литературы

- [1] Азманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. // УФН. 1986. Т. 149. С. 449–509.
- [2] Rogister A. // Phys. Fluids. 1971. Vol. 14. P. 2733–2741.
- [3] Mjølhus E. // J. Plasma Phys. 1976. Vol. 16. P. 321–328.
- [4] Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. С. 526–527.
- [5] Камчатнов А.М. // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. Вып. 1. С. 144–152.
- [6] Вайнштейн С.Н., Топтыгин И.Н., Быков А.М. Турбулентность, токовые слои и ударные волны в космической плазме. М.: Наука, 1989. Гл. 8.
- [7] Гуревич А.В., Питаевский Л.П. // ЖЭТФ. 1987. Т. 92. Вып. 3. С. 871–879.
- [8] Гуревич А.В., Питаевский Л.П. // ЖЭТФ. 1973. Т. 65. Вып. 2. С. 590–604.

Чечено-Ингушский университет  
Грозный

Поступило в Редакцию  
16 января 1992 г.  
В окончательной редакции  
7 сентября 1992 г.

03

Журнал технической физики, т. 62, в. 11, 1992

© 1992 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КСЕНОНОВЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КЛАПАНА

Г.С.Волков, В.П.Гигиберия, С.А.Комаров, В.А.Корнило, М.В.Тулупов

В последнее время в качестве лайнерной нагрузки сильноточных генераторов РЭП с большим успехом используются полые или сплошные газовые струи из различных газов [1,2]. Как правило, струя формируется сверхзвуковым соплом с числом Маха от 3 до 8. Импульсная подача газа осуществляется пороховой пушкой или электромагнитным клапаном. Для успешного использования газовой струи в качестве лайнерной нагрузки нужно знать ее основные параметры.

В ряде работ для определения параметров струи использовался датчик типа быстрой ионизационной лампы [3,4]. Возможно также измерение параметров струи по лазерным интерферограммам. Правда в этом случае затруднительно измерить погонную концентрацию  $nl < 10^{18}$  см<sup>-2</sup>.

В нашей работе описано исследование работы электромагнитного клапана и параметров ксеноновой струи на выходе сверхзвукового сопла. Клапан предназначен для проведения лайнерных экспериментов на установке "Ангара-5-1". Требуемые параметры полый струи: газ ксенон, погонная масса 100–150 мкг/см, диаметр 30 мм.

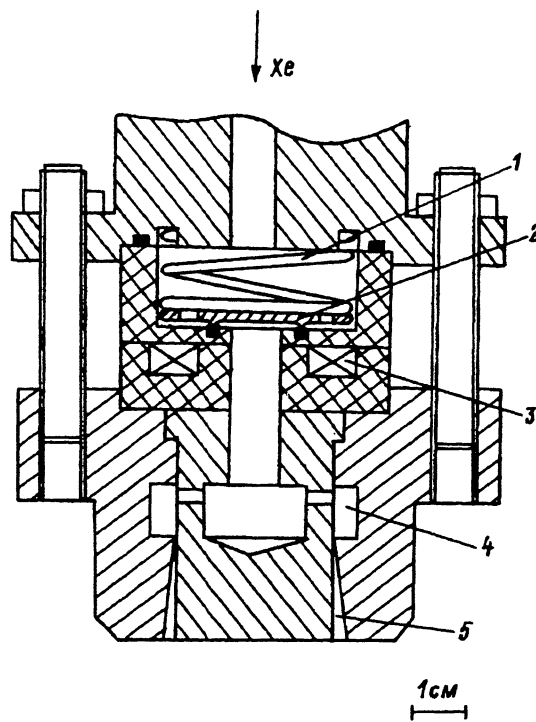


Рис. 1. Конструкция клапана и сопла.  
 1 — пружина, 2 — мембрана,  
 3 — электромагнитная катушка,  
 4 — форкамера сопла, 5 — сопло.

На рис. 1 приведена конструкция клапана и геометрия сопла. Питание восьмивитковой электромагнитной катушки осуществлялось разрядом емкости  $C = 100$  мкф, заряженной до напряжения 3 кВ. Создаваемое катушкой магнитное поле действует на дюралюминиевую мембрану массой 10 г, перекрывающую доступ газа в форкамеру сопла. Под действием электромагнитной силы мембрана отбрасывается, газ начинает поступать в форкамеру сопла. Возвратное движение мембраны при работе клапана обеспечивается пружиной, создающей усилие  $\approx 30$  Н. В первых экспериментах использовалось кольцевое непрофилированное сопло (рис. 1). Критическое сечение представляет собой кольцевую щель шириной  $\approx 100$  мкм на диаметре 2.4 см. Сечение сопла на его срезе представляет собой кольцо с внутренним диаметром 2.4 см, внешним 3 см и площадью  $\approx 2.5$  см<sup>2</sup>.

Погонная масса струи в зависимости от времени определялась по поглощению мягкого рентгеновского излучения. При этом использовалось характеристическое излучение  $K_{\alpha}$  Al с энергией 1.50 кэВ, возникающее при бомбардировке электронами алюминиевого анода диода с холодной эмиссией. Диод запитывался от быстрого газового ГИН, собранного по схеме Аркадьева-Маркса аналогично [5]. Параметры электронного пучка: ток 1.5 кА, длительность 80 нс, энергия электронов 80 кэВ. Величина поглощения излучения при требуемых параметрах струи ( $m_n = 100$ –150 мкг/см) составляет 10–20% при просвечивании струи по диаметру.

Регистрация мягкого рентгеновского излучения проводилась спинтилляционным детектором с ФЭУ. В качестве конвертора излучения использовался тонкий пластиковый спинтиллятор толщиной 25 мкм, уста-

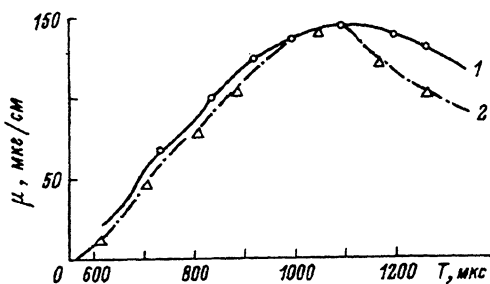


Рис. 2. Зависимость погонной массы струи от времени при давлении в клапане 4 атм.

1 — результаты по просвечиванию струи, 2 — показания пьезодатчика.

новленный под углом  $45^\circ$  к падающему излучению. Для измерений использовались два одинаковых сцинтилляционных детектора. Один регистрировал излучение, прошедшее через газовую струю, по ее диаметру вблизи среза сопла. Другой служил репером и регистрировал поток мягкого рентгеновского излучения до струи. Оба детектора регистрировали излучение в близком телесном угле. Сравнение сигналов детекторов, экранированных парой фильтров Росса Al 6.5 мкм и Mg 13 мкм, показало, что вклад линейчатого излучения в сигнал составляет около 93% при выходном напряжении ГИН 80 кВ. При этом и как в работе [6], излучение регистрировалось под углом  $120^\circ$  к направлению бомбардировки электронами анода для уменьшения фона тормозного непрерывного излучения. Поглощение определялось по отношению сигналов ФЭУ с учетом доли тормозного излучения в сигналах.

Так как длительность зондирующего импульса рентгеновского излучения ( $\approx 50$  нс) намного меньше, чем времена установления стационарного истечения газовой струи ( $\approx 1$  мс), то проводилась серия измерений с изменением задержки срабатывания ГИН относительно срабатывания клапана. Перед каждой серией экспериментов делалось несколько выстрелов только ГИН без клапана. Было определено, что отношение сигналов ФЭУ колеблется в пределах  $\pm 8\%$ . Поэтому при каждой задержке срабатывания ГИН брались результаты, усредненные по трем выстрелам, что уменьшало влияние разброса до 4% и обеспечивало точность измерения погонной массы  $\sim 30\%$ .

Для сокращения времени на измерения параметров струи в форкамеру сопла был установлен виброкомпенсированный пьезодатчик давления на основе ЦТС керамики. При этом считалось, что между давлением в форкамере и плотностью струи на выходе существует пропорциональная зависимость. Таким образом, сняв за одно срабатывание клапана относительный ход давления в форкамере и измерив по поглощению абсолютное значение погонной массы струи в один из моментов времени, получали всю кривую зависимости погонной массы струи от времени. При этом учитывалось, что возмущения плотности газа передаются от пьезодатчика до среза сопла за 150–200 мкс.

На рис. 2 приведена зависимость погонной массы струи от времени при начальном давлении в клапане 4 атм. Газ появляется через 600 мкс после срабатывания клапана. Максимум погонной массы струи при 4 атм достигается на 1100 мкс и составляет  $m_n = 140$  мкг/см.

Для того чтобы определить общий вид струи и ее расходимость, было проведено просвечивание струи мягким рентгеновским излучением того же источника с регистрацией прошедшего излучения на рентгеновской пленке УФШ-С. Окно кассеты с пленкой закрывалось алюминиевым

фильтром толщиной 6.5 мкм. При этом просвечивалась струя из профилированного сопла длиной 7 мм с уменьшенным объемом форкамеры и шириной на выходе 2 мм. Входное давление составляло 5 атм. Изображение регистрировалось через 1 мс после срабатывания клапана.

С помощью фильтров Росса Al и Mg было определено, что за магнелиевым фильтром почернением пленки можно пренебречь по сравнению с ее почернением за алюминиевым фильтром, т.е. в засветку пленки за алюминиевым фильтром почти весь вклад вносит K-линия алюминия. Одновременно на этом же рентгеновском источнике снималась кривая почернения пленки с использованием ступенчатого ослабителя. По кривой почернения пленки восстанавливалось поглощение струей линии  $K_{\alpha}$  Al. По полученному поглощению восстанавливалось распределение концентрации струи по радиусу решением обратной задачи Абеля по методу, описанному в работе [7]. Оказалось, что струя имеет хорошую кольцевую форму. Максимальная концентрация газа в струе на расстоянии 2 мм от среза сопла составляет  $n \sim 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . На расстоянии 8 мм от среза сопла струя уширяется вдвое, при этом плотность в струе падает до величины  $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует числу Маха струи  $M \approx 5$ .

Таким образом, описанные в работе клапан и методика позволили создать сверхзвуковую полую струю газа Хе и определить ее основные параметры. Использование пьезодатчика позволило сократить время на исследование параметров струи и поднять чувствительность методики.

#### Список литературы

- [1] *Stalling C., Childers K., Roth I., Shneider R.* // Appl. Phys. Lett. 1979. Vol. 35. N. 7. P. 524-526.
- [2] *Spielman R.B., Hanson D.L., Palmer M.A. et al.* // J.Appl. Phys. 1985. Vol. 57. N 3. P. 830-833.
- [3] *Clark W., Richardson R., Brannon J. et al.* // J.Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 8. P. 5552-5556.
- [4] *Fisher A., Maro F., Shilon J.* // Rev.Sci. Instr. 1978. Vol. 49. P. 892-893.
- [5] *Капишников Н.К., Муратов В.М., Поманов В.С.* // ПТЭ. 1984. № 4. С. 98-100.
- [6] *Sparrow J., Dick C.* // Nucl. Instr. Meth. 1977. Vol. 141. N 2. P. 283-292.
- [7] *Vicharelli P.A., Lapatovich W.P.* // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 50. N 9.

Поступило в Редакцию 26 мая 1989 г.  
В окончательной редакции 6 июня 1991 г.

---