

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 62–331:533.6.011.8

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА, ФОРМИРУЕМОГО
С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КЛАПАНА**

© 1997 г. Г. Г. Гартвич, В. Г. Дудников*, А. Е. Зарвин, В. В. Каляда, В. Ж. Мадирбаев

*Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

Поступила в редакцию 10.01.96 г.

После доработки 02.08.96 г.

Исследованы характеристики импульсных потоков разреженного газа, формирующихся за сверхзвуковым соплом при истечении через быстродействующий электромагнитный клапан. Показана воспроизводимость газодинамических параметров на квазистационарном участке импульса. Это позволяет использовать клапан подобной конструкции при моделировании течений в условиях высоких давлений торможения и больших мгновенных расходов рабочего газа.

Системы формирования импульсных газовых мишеней широко используются при проведении ядерных исследований [1–4]. При этом, как правило, изучение газодинамики импульсных сверхзвуковых струй, образующихся за клапаном, ограничивается измерением зависимости интенсивности (плотности) газового пакета от времени в области доставки газовой мишени. С другой стороны, исследование процесса истечения газового импульса, формирования квазистационарного ядра сверхзвуковой струи, пространственных распределений плотности и скорости представляет интерес как для оптимизации режимов работы клапанных устройств в традиционных целях, так и для исследований в области неравновесной газовой динамики [5–7].

В данной работе представлены результаты исследования газодинамических характеристик импульсного электромагнитного клапана разработки Института ядерной физики СО РАН [8] (схема клапана показана на рис. 1). Изучены параметры формируемых газовых импульсов и характеристики газовых потоков, вытекающих из сверхзвуковых сопел в зависимости от режимов работы клапана, при различных давлениях газа (воздуха) в форкамере сопла и параметрах управляющего электрического импульса.

Исследования проводились на газодинамическом стенде УДИАВ отдела прикладной физики Новосибирского государственного университета [9]. Временные и пространственные профили плотности газа, истекающего из сопла, измерялись с помощью методов электронно-пучковой диагностики (э.п.д.) [10]. Подача воздуха в импульсный клапан осуществлялась через редуктор. Посколь-

ку средний расход газа через клапан мал, давление P_0 измерялось на входе в клапан.

Оптические измерения плотности с помощью э.п.д. проводились на длине волны 391.4 нм, что соответствует канту полосы $O-O$ первой отрицательной системы полос иона молекулярного азота. Для регистрации интенсивности оптического сигнала использовались импульсный ФЭУ-114, одноканальная система накопления и усиления сигнала и самопишущий потенциометр. Временное разрешение, определяемое шириной стробирующего импульса, временной базой и длительностью накопления, составляло в зависимости от режимов измерений 10–50 мкс.

Расстояние между срезом сопла и точкой наблюдения измерялось катетометром, продольные и поперечные перемещения сопла контролировались сельсин-датчиками. Пространственное разрешение, определяемое диаметром электронного пучка, составляло <1 мм. Из-за периодического режима работы клапана плотность измерялась в фиксированных точках струи, в которых полностью прописывались изменения плотности во времени.

Для управления клапаном был разработан блок питания, отличающийся от описанных ранее. Схема блока показана на рис. 1. В его состав входят емкость C_2 (К50-17, 1500 мкФ, 350 В), заряжаемая от нескольких слаботочных источников питания типа Б5-49, соединенных последовательно, и транзисторная схема, управляемая генератором Г5-54, с помощью которой короткий прямоугольный импульс тока с обкладок конденсатора подавался на катушку электромагнита клапана. Амплитуда формируемого токового импульса регулировалась напряжением на конденсаторе, а его временные характеристики – генератором Г5-54. Блок обеспечивал генерацию управляющих

* ГНЦ РФ "Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН", Новосибирск.

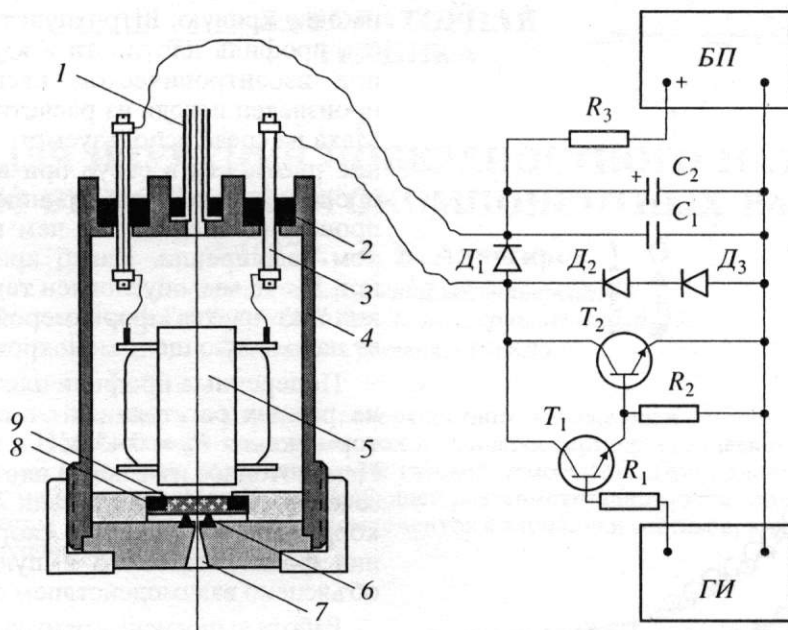


Рис. 1. Схема клапана и блока питания. 1 – ввод газа, 2 – уплотнитель, 3 – токоввод, 4 – корпус клапана, 5 – катушка электромагнита, 6 – уплотнитель, 7 – сопло, 8 – амортизаторы, 9 – якорь; БП – источник питания, ГИ – генератор импульсов.

импульсов с частотой следования 8–15 Гц, длительностью 0.05–5 мс, амплитудой 0–300 В и фронтом <0.01 мс. При этом ток в импульсе мог достигать 8 А. Кроме давления торможения и параметров управляющего импульса, варьировались также конструкционные элементы клапана [8] (жесткость амортизаторов, их длина и т.п.).

Измерения проводились на сверхзвуковых соплах с диаметрами критического сечения $d_{кр}$, равными 0.2 и 0.7 мм, углом раствора $2\alpha \sim 14.5^\circ$ и диаметром выходного отверстия $D = 2.2$ мм. Характеристики газового импульса, формируемого клапаном, исследовались в диапазоне длительностей управляющего импульса $T_{упр} = 0.05$ –1.3 мс при напряжениях $U = 5$ –300 В и давлениях торможения $P_0 = 0.1$ –1.4 МПа. Плотность измерялась на расстоянии ~ 22 мм ($X/D = 10$) от среза сопла.

Типичные зависимости интенсивности свечения газа в импульсе от времени, полученные при длительности управляющего импульса $T_{упр} = 0.15$, 0.2, 0.6 и 1.0 мс (кривые 1–4 соответственно), давлении торможения $P_0 = 1.3$ МПа и амплитуде управляющего импульса $U = 200$ В, приведены на рис. 2. Как следует из рисунка, длительность светового импульса во всех режимах, кроме первого, больше ширины управляющего импульса. Фронт светового импульса (при вычитании аппаратного уширения) составляет ~ 0.05 мс, ширина квазистационарного участка – 0.4 мс, спад ~ 0.15 мс. Таким образом, испытанный вариант клапана обеспечивает достаточно длительное “плато” квазистационарного истечения.

Из приведенных на рисунке и аналогичных им результатов следует, что при больших временах открывания полуширина светового импульса, т.е. длительность истечения газовой струи, пропорциональна длительности управляющего импульса, тогда как амплитуда импульса практически не зависит от него, таким образом, газодинамические параметры на квазистационарном участке импульсов воспроизводимы, что позволяет использовать клапан в струйных и молекулярно-пучковых исследованиях.

На рис. 3 показаны продольные профили плотности в импульсной струе, истекающей из сопла с диаметром критического сечения 0.2 мм, полученные при значениях давления торможения $P_0 = 1.3$,

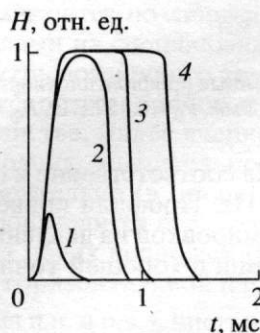


Рис. 2. Зависимости интенсивности свечения газа в импульсе от времени при значениях $T_{упр} = 0.15$ (1), 0.2 (2), 0.6 (3), 1.0 мс (4); $d_{кр} = 0.2$ мм, $P_0 = 1.3$ МПа. $U = 200$ В.

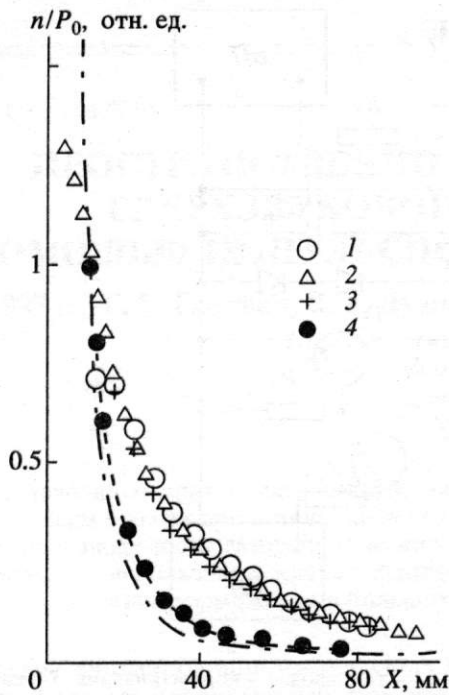


Рис. 3. Продольные профили плотности в импульсной струе. 1–3 – $d_{кр} = 0.2$ мм, $P_0 = 1.3, 0.85, 0.45$ МПа соответственно, 4 – $d_{кр} = 0.7$ мм, $P_0 = 0.1$ МПа.

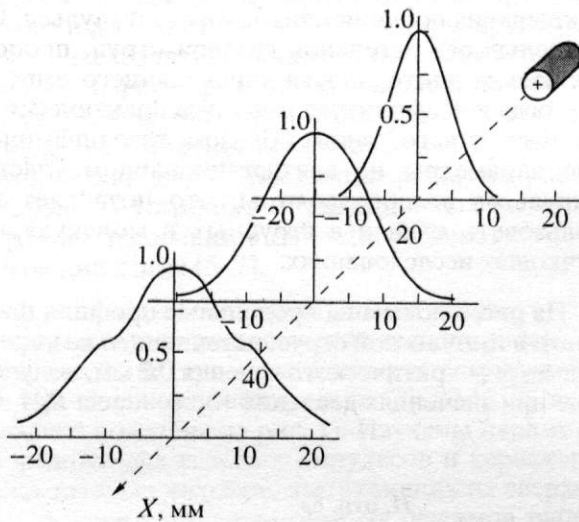


Рис. 4. Поперечные профили плотности в импульсной струе. $d_{кр} = 0.2$ мм, $P_0 = 0.45$ МПа, $P_{\phi} = 0.72$ Па.

0.85 и 0.45 МПа соответственно и фоновом давлении $P_{\phi} = 0.72$ Па. Профили приведены к одному масштабу нормировкой на давление торможения, при этом все они с хорошей точностью ложатся

на одну кривую. Штрихпунктирной линией нанесен профиль плотности в ядре свободной струи при изэнтропическом расширении (пересчет произведен исходя из расчетного значения числа Маха на срезе используемого сопла $M = 4$). Падение плотности в струе при высоких P_0 обратно пропорционально расстоянию от среза сопла, т.е. происходит медленнее, чем при изэнтропическом расширении. Изгиб кривой, наблюдаемый при $X < 15$ мм, обусловлен тем, что часть излучения “затеняется” форкамерой сопла и не попадает на входную щель монохроматора.

Поперечные профили плотности, измеренные на разных расстояниях от сопла при давлении торможения $P_0 = 0.45$ МПа, показаны на рис. 4. Немонотонное изменение плотности в поперечном сечении струи на расстоянии $X = 52$ мм ($X/D = 24$) коррелирует с падением скорости распространения фронта газового импульса и может быть объяснено взаимодействием с фоновым газом.

Работа выполнена в рамках Межвузовской научно-технической программы “Университеты России” (Раздел 2, программа “Химия в сверхзвуковых струях”) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 96-03-33924).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Димов Г.И. // ПТЭ. 1968. № 5. С. 168.
2. Боровков И.С., Вершинин И.Д. и др. // Сб. докл. IV Всесоюз. конф. по динамике разреженного газа. М.: Изд-во ЦАГИ, 1975.
3. Александров В.С., Новиков В.Г., Павлов Э.П. и др. Препринт ОИЯИ Р9-10278. Дубна, 1976.
4. Бобылев В.Б., Бурдаков А.В., Локонов К.В. // ПТЭ. 1996. № 1. С. 152.
5. Bier K., Hagena O. // 4-th Internat. Symp. “Rarefied Gas Dynamics”. N.Y., London: Acad. Press, 1966. V. 2. P. 260.
6. Gentry W.R. // Proc. 14-th Internat. Symp. “Rarefied Gas Dynamics” / Ed. Nakuro Oguchi. Tokyo: University of Tokyo Press, 1984. V. 11. P. 793.
7. Чекмарев С.Ф. Импульсные течения газа в сверхзвуковых соплах и струях. Новосибирск: Изд-во ИТ СО АН, 1989. 342 с.
8. Деревянкин Г.Е., Дудников В.Г., Журавлев П.А. // ПТЭ. 1975. № 5. С. 168.
9. Гартвич Г.Г., Зарвин А.Е., Каляда В.В. и др. // ПМТФ. 1993. № 5. С. 150.
10. Бочкарев А.А., Косинов В.А., Ребров А.К., Шарфутдинов В.Г. // Экспериментальные методы в динамике разреженных газов. Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 1974. С. 98.