

03

## О возможности запираания сверхзвуковой импульсной газовой струи поперечным разрядом

© Н.Г. Коробейщиков, А.Е. Зарвин, В.В. Каляда

Новосибирский государственный университет

E-mail: korobei@ci.nsu.ru

Поступило в Редакцию 26 марта 2010 г.

Обнаружено, что при активации поперечным дуговым разрядом импульсной сверхзвуковой газовой струи возможно эффективное запираание пакета нейтрального газа. Время задержки определяется длительностью горения разряда. После гашения разряда формируется задержанный газовый импульс нейтральных частиц, интенсивность которого растет с ростом мощности разряда и может превышать интенсивность импульса в отсутствии разряда. Зарегистрировано также формирование интенсивного пучка ионов рабочего газа, распространяющихся перпендикулярно направлению электрического разряда со скоростью, превышающей скорость газового потока.

Электрические разряды в сверхзвуковых газовых потоках представляют интерес для развития перспективных плазменных технологий в области плазменной аэродинамики [1–2], для генерации активных радикалов в газоструйной низкотемпературной плазмохимии [3], при горении топливо-воздушных смесей [4] и т. д. Сильная неравновесность и неоднородность как макро-, так и микропараметров обуславливают сложность процессов, сопровождающих протекание разрядов в сверхзвуковых потоках.

В работе исследовано воздействие сильноточного дугового разряда на импульсную недорасширенную газовую струю, истекающую в пространство с пониженным давлением фона. Эксперименты проводились на универсальном газодинамическом стенде ЛЭМПУС Новосибирского государственного университета [5]. Импульсная сверхзвуковая струя формировалась с помощью электромагнитного клапана [6] со звуковым соплом диаметром  $d = 1 \text{ mm}$ , установленного внутри вакуумной камеры. Длительность газовых импульсов на выходе из

источника составляла  $\sim 1$  ms. Давление в форкамере сопла (давление торможения)  $P_0$  в экспериментах варьировалось в диапазоне от  $10^1$  до  $10^3$  кПа.

Разрядная система, собранная из двух соосных тонких заостренных вольфрамовых электродов, устанавливалась перпендикулярно оси газового потока на расстоянии 10–20 калибров от сопла. Величина разрядного промежутка составляла  $\sim 5$  mm, что обеспечивало незначительное возмущение приосевой области течения. Для инициации разряда использовался емкостной источник с изменяемой накопительной емкостью  $C$  и напряжением  $U = 0.6\text{--}2.4$  kV. Мощность, вводимая в поток за единичный газовый импульс, варьировалась от 50 до 200 J. Как известно, проводимость разрядного промежутка зависит от приведенной напряженности  $E/N$ , где  $E$  — напряженность электрического поля,  $N$  — плотность частиц. В течение разряда конденсатора  $E/N$  уменьшается с постоянной времени  $\tau = (R_b + R(t))C$ , где  $R_b$  — балластное сопротивление в цепи питания,  $R(t)$  — сопротивление разрядного промежутка. В характерных режимах настоящей работы ( $U_0 = 1$  kV,  $P_0 = 10^3$  кПа) максимальное значение  $E/N$  без учета катодного падения потенциала составляло  $\sim 10^{-14}$  V · cm<sup>2</sup>.

Для регистрации импульсных потоков использовалась молекулярно-пучковая масс-спектрометрия. Молекулярный пучок формировался из сверхзвуковой струи с помощью конусообразной диафрагмы (скиммера) диаметром 0.5 mm, расположенной на расстоянии 100 калибров от сопла. Детектирование импульсного молекулярного пучка осуществлялось квадрупольным масс-спектрометром с ионизацией электронным ударом. Измерения проводились в струях гелия, аргона, метана, двуокиси углерода. Регистрировались зависимости от времени сигнала масс-спектрометра (ионного тока) на фиксированных массах. Быстродействие системы регистрации составляло  $\sim 10$  μs.

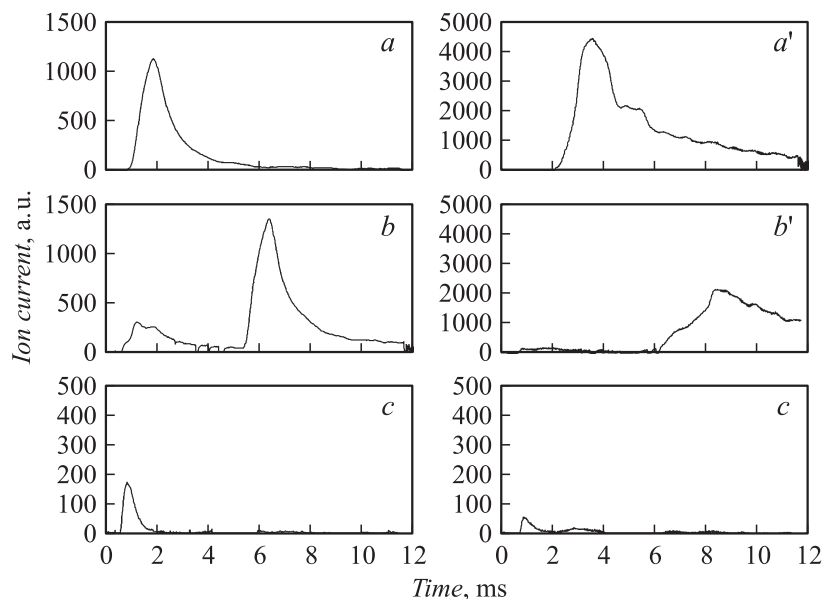
В отсутствии газовых импульсов фоновое давление в камере расширения составляло  $\sim 10^{-1}$  Pa, поэтому при подаче на электроды рабочего напряжения разряд не зажигался. После запуска клапана передний фронт истекающего газа достигал разрядного промежутка, что и приводило к инициализации разряда. Таким образом, происходило „самозажигание“ разряда в струе. В экспериментах в зависимости от давления торможения и напряжения на электродах наблюдался тлеющий или дуговой разряд. При малых плотностях потока (давление  $P_0 \leq 10^2$  кПа) и напряжениях  $U_0 \leq 1$  kV возникал тлеющий разряд

с малыми токами ( $I < 10^2$  mA) и слабым свечением рабочего газа. В таких условиях характеристики импульсных сигналов практически не менялись.

Увеличение напряжения  $U_0$  при малой  $RC$ -постоянной разрядной цепи приводило к переходу разряда в дуговой режим. За время  $\sim 100 \mu\text{s}$  достигались максимальные значения разрядного тока (до 300 A), что соответствует скоростям нарастания тока  $> 10^6$  A/s. Как известно, высокие скорости нарастания тока обуславливают взрывную эмиссию ионов. В нашем случае интенсивно разрушался заземленный анод, что, по-видимому, приводило к выбросу в газовый поток материала анода. С целью ограничения мгновенного тока и увеличения длительности разряда в цепь включалось балластное сопротивление  $R_b$ . Увеличение  $RC$  разрядной цепи позволило достигать длительности разряда, превышающей длительность газового импульса. Например, при  $RC \sim 0.003$  s время существования разряда достигало 10 ms при длительности газового импульса 1 ms.

На рисунке приведены характерные временные развертки сигналов, зарегистрированные при активации струи соответственно гелия и аргона дуговым разрядом в одних и тех же условиях:  $P_0 = 1100$  kPa, емкость  $C = 330 \mu\text{F}$ , начальное напряжение  $U_0 = 1.2$  kV. Время отсчитывалось от момента подачи импульса, отпирающего газовый клапан. В отсутствие разряда (см. рисунок) скорость движения переднего фронта истекающего газа определяется вытеснением фонового газа из области течения [7]. Газовый импульс гелия достигает детектора через  $\sim 1.4 \mu\text{s}$ , аргона — через  $\sim 3 \mu\text{s}$ . При разряде в гелии (см. рисунок, *b*) скорость исходного газового импульса не меняется, но его интенсивность уменьшается в 3–5 раз. В аргоне (см. рисунок, *b*) исходный импульс практически исчезает. Такое различие вызвано тем, что при  $P_0 d = 1.1 \cdot 10^3$  kPa · mm молекулярный пучок, сформированный на оси струи аргона, состоит преимущественно из крупных кластеров [8]. Введение в поток разряда вызывает фрагментацию и испарение кластеров, что и приводит к падению сигнала в пучке.

Обнаружено, что перед основным импульсом регистрировался сигнал быстрых частиц, достигающих детектора раньше газового импульса (см. рисунок, *b, b'*). Измерения при выключенном ионизаторе масс-спектрометра (*c, c'*) показали, что этот сигнал обусловлен образованием в разряде значительного количества ионов рабочего газа. Интенсив-



Временные развертки сигналов, зарегистрированные в струях гелия ( $a-b$ ) и аргона ( $a'-b'$ ):  $a, a'$  — без разряда,  $b, b'$  — с разрядом,  $c, c'$  — с отключенным ионизатором.

ность ионного сигнала в гелии достигает 5–10% от исходного газового, в аргоне — до 2–3%. Оценка из экспериментальных данных скорости ионного импульса дает в гелии  $\sim 1100-2200$  ms. Это значительно выше скорости газового потока. Недавно в [9] была предложена кумулятивно-диссипативная модель газоразрядной плазмы, в которой показана возможность существования областей с нормальной составляющей напряженности электрического поля к поверхности плазменной структуры, превосходящей продольную компоненту. Отметим, что зарегистрированный нами ионный импульс двигался поперек направления электрического поля разряда.

Наиболее интересным представляется следующий обнаруженный экспериментальный факт. Во всех режимах с активацией струи были зарегистрированы вторичные, задержанные импульсы (см. рисунок,  $b, b'$ ). Форма задержанных сигналов соответствовала форме исходного газо-

вого импульса. Измерения при различных значениях  $RC$  разрядной цепи для различных газов показали, что величина задержки вторичного импульса не зависит от сорта газа, а определяется длительностью разряда. Величина задержки рассчитывалась по переднему фронту на полувысоте импульса относительно импульса в отсутствие разряда. Задержанный импульс регистрировался в режимах, когда длительность разряда превышала длительность газового импульса. В гелии интенсивность задержанного импульса в 1.5–2 раза превышала интенсивность сигнала без разряда. В аргоне интенсивность задержанного импульса оказалась меньше исходного сигнала. Как уже отмечалось выше, мы полагаем, что это происходило вследствие развала кластеров под воздействием разряда.

В работах [10,11], в которых экспериментально исследовались свойства поперечных разрядов в затопленных сверхзвуковых струях, был зарегистрирован вынос разрядного канала с образованием длинных плазменных шнуров вниз по потоку от катода и анода. Отмечен также нестационарный характер разряда с периодическим переключением разрядом плазменных шнуров. Можно предположить, что в наших условиях при понижении тока разряда ниже критической величины происходили разрыв поперечной плазменной структуры и формирование продольных областей, что и обеспечило кумулятивный эффект для задержанной доли истекающего газа.

Таким образом, установлено, что при активации импульсной сверхзвуковой газовой струи сильноточным дуговым разрядом формируется устойчивая плазменная структура, состоящая как из ионизованных частиц рабочего газа, так и из ионов материала электродов. Это может приводить к частичному запиранию газового потока. После гашения регистрируется задержанный импульс нейтрального газа. Интенсивность задержанного газового импульса растет с увеличением энергии разряда и может превышать интенсивность импульса без разряда (таким образом, наблюдается эффект кумуляции газового потока). Величина задержки определяется длительностью разряда и может достигать десятка миллисекунд. Зарегистрировано формирование интенсивного ионного импульса, состоящего из ионов рабочего газа и движущегося вдоль оси струи, поперек направления электрического поля разряда. Скорость ионного импульса существенно превышает скорость газового потока: до 4200 м/с в гелии и до 2300 м/с в аргоне. Указанные эффекты не связаны с наличием кластеров в потоке.

## Список литературы

- [1] *Alexandrov A.F., Ardelyan N.V., Chuvashv S.N.* et al. // J. Tech. Phys. 2000. V. 41. P. 533–550.
- [2] *Фомин В.М., Аульченко С.М., Замураев В.П., Калинина А.П.* // ДАН. 2008. Т. 422. № 4. С. 484–486.
- [3] *Plasma Chemistry* / Ed. by L.S. Polak, Yu.A. Lebedev. L.: Cambridge Interscience Publ., 1998.
- [4] *Klimov A., Belevtsev A., Bityurin B.* et al. Proc. 15th Int. Conf. on MHD Energy Conversion and 6th Int. Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics, Moscow, 24–27 May, 2005. P. 329–334.
- [5] *Зарвин А.Е., Коробейщиков Н.Г., Мадирбаев В.Ж.* и др. // ПТЭ. 2000. № 5. С. 64–70.
- [6] *Гартвич Г.Г., Дудников В.А., Зарвин А.Е.* и др. // ПТЭ. 1997. № 2. С. 134–136.
- [7] *Коробейщиков Н.Г., Зарвин А.Е., Мадирбаев В.Ж.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 8. С. 21–29.
- [8] *Korobeishchikov N.G., Zarvin A.E., Madirbaev V.Zh.* et al. // PCPP. 2005. V 25. N 4. P. 319–349.
- [9] *Высикайло Ф.И.* // ЖЭТФ. 2004. Т. 125. С. 1071–1081.
- [10] *Ершов А.П., Сурконт О.С., Тимофеев И.Б.* и др. // ТВТ. 2004. Т. 42. № 4. С. 516.
- [11] *Ершов А.П., Черников В.А., Шибков В.М.* Поперечные электрические разряды в сверхзвуковых потоках воздуха. М.: МГУ, 2006.