

УДК 533.6.011.8

## НЕЙТРАЛИЗАТОР С ГАЗОВЫМ ЭЖЕКТОРОМ

С. Т. Барашкин, М. Ш. Гадельшин, Б. Т. Породнов

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
620002 Екатеринбург  
E-mail: bars@dpt.ustu.ru

Изучена модель нейтрализатора с газовым эжектором, основной элемент которого — звуковое сопло — представляет собой зазор между двумя коническими поверхностями. Представлены распределения статического давления, измеренного вдоль оси нейтрализатора при различных значениях давления газа в ресивере. Приведены значения давления торможения, полного расхода, толщины газовой мишени, коэффициента разделения потока, числа Кнудсена, газодинамической эффективности нейтрализатора, вычисленные по значениям давления газа на оси нейтрализатора в точке с координатой  $z/d = 3$ , представлены распределения статического давления в характерных поперечных сечениях нейтрализатора.

Ключевые слова: разреженный газ, свободномолекулярный, промежуточный и вязкий режимы течения, газовая мишень.

При эксплуатации инжекторов быстрых атомов водорода важной задачей является минимизация потока молекул нейтрализующего газа в направлении движения быстрых атомов. Эту задачу можно решить, используя несимметричный нейтрализатор с газовым эжектором, осуществляющим вдув газа. Эжекторы широко применяются в вакуумной технике для пароструйной откачки газов, их использование позволяет осуществить перенос молекул газа преимущественно в направлении эжекции за счет действия сил внутреннего трения [1, 2]. На этом механизме переноса основан принцип работы нейтрализатора с газовым эжектором.

Схема исследуемого нейтрализатора приведена на рис. 1 ( $l$ ,  $d$  — длина и диаметр канала нейтрализатора соответственно, мм;  $d_1 = 1,2d$  — диаметр цилиндрического канала, устанавливаемого на корпус сопла для предотвращения разлета молекул газа;  $N$  — полный расход газа в нейтрализаторе, моль/с;  $N_+$ ,  $N_-$  — удельный расход молекул газа в направлении эжекции и в направлении, противоположном эжекции, соответственно, моль/с;  $P_0$  — давление в ресивере, Па). Основной элемент газового эжектора — звуковое сопло — представляет собой зазор между двумя коническими поверхностями  $A$  и  $B$ , отполированными по шестому классу точности.

Исследования распределения газодинамических параметров в нейтрализаторе проводились с использованием комбинированного насадка (трубки Пито). Расчет числа Маха по измеренным значениям полного давления  $P_f$  и статического давления  $P_{st}$  в континуальном режиме течения в окрестности вершины трубки Пито проводился с использованием формул газодинамики [1], получаемых из уравнения сохранения энергии в предположении адиабатичности процесса торможения, а также с помощью соотношения Гюгонио

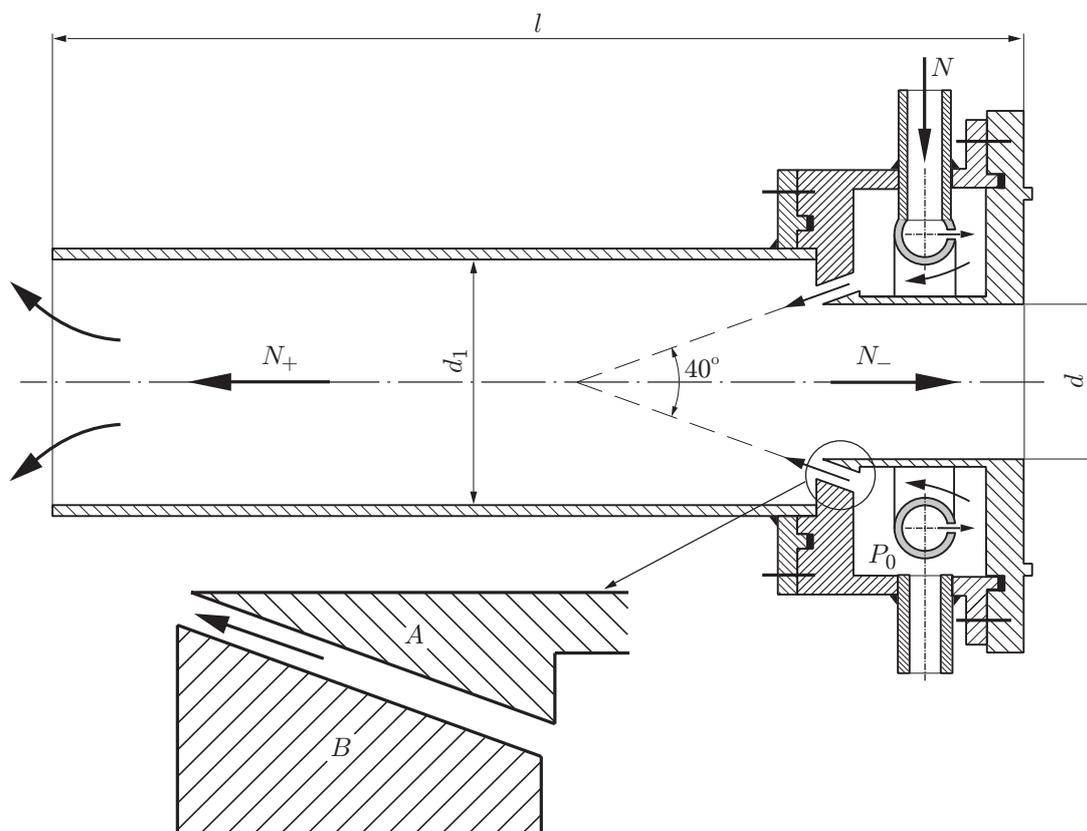


Рис. 1. Схема нейтрализатора с газовым эжектором ( $l = 240$  мм,  $d = 40$  мм):  
внизу — сечение звукового сопла

для сверхзвуковых скоростей. При свободномолекулярном режиме течения в окрестности вершины трубки Пито значения числа Маха вычислялись с использованием результатов работы [3]. В промежуточном режиме обтекания вершины трубки Пито со сверхзвуковыми скоростями при вычисляемых по диаметру этой вершины значениях числа Кнудсена  $Kn = \lambda/d = 0,1 \div 5,0$  ( $\lambda$  — средняя длина свободного пробега молекул нейтрализующего газа) число Маха рассчитывалось с использованием результатов работы [4]. В случае дозвуковых скоростей использованы результаты градуировки трубки Пито на специально собранной установке в однородном по сечению газовом потоке, газодинамические характеристики которого определялись по результатам измерения расхода и статического давления в предположении адиабатического расширения.

Результаты измерения статического давления  $P_{st}$  вдоль оси при различных значениях числа Кнудсена представлены на рис. 2, а в виде зависимости величины  $P_{st}/(NkT)$  от координаты  $z/d$  ( $T$  — температура газа в нейтрализаторе, К;  $k$  — постоянная Больцмана). Видно, что максимальные значения статического давления наблюдаются вблизи области вдува газа. Слева и справа от максимума значения  $P_{st}$  изменяются по-разному. В направлении, противоположном эжекции газа в нейтрализатор, статическое давление понижается значительно быстрее, чем в направлении эжекции. При  $Kn = 4,2 \cdot 10^{-3}$  (континуальный режим течения) наблюдается скачкообразное изменение статического давления вдоль оси, обусловленное, по-видимому, возникновением скачков уплотнения.

В таблице приведены значения давления торможения  $P_0$ , полного расхода  $N$ , коэффициента разделения потока  $\psi = N_-/N$ , числа Кнудсена  $Kn$ , толщины газовой мишени  $\nu$ , газодинамической эффективности нейтрализатора  $\tau$ , скорости истечения углекислого га-

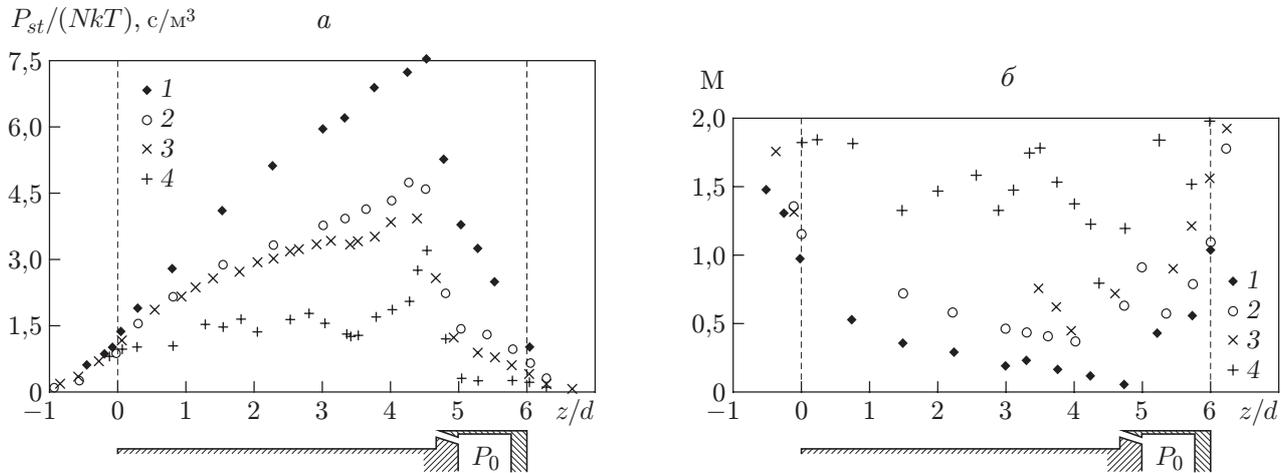


Рис. 2. Распределения статического давления (*а*) и числа Маха (*б*) вдоль оси модели:  
 1 —  $\text{Kn} = 0,108$ ; 2 —  $\text{Kn} = 1,37 \cdot 10^{-2}$ ; 3 —  $\text{Kn} = 2,41 \cdot 10^{-2}$ ; 4 —  $\text{Kn} = 4,2 \cdot 10^{-3}$ ;  
 штриховые линии — границы канала нейтрализатора

Основные газодинамические параметры модели нейтрализатора с газовым эжектором

$P_0$ , Па	$N \cdot 10^{-20}$ , $\text{c}^{-1}$	$\psi$	$\text{Kn}$	$\nu \cdot 10^{-16}$ , $\text{cm}^{-2}$	$\tau \cdot 10^3$ , с	$\langle u \rangle$ , м/с
40	0,277	0,290	0,1080	0,305	1,390	50,1
150	1,960	0,147	0,0241	1,360	0,880	40,2
241	3,840	0,093	0,0137	2,370	0,780	28,7
997	27,600	0,047	0,0042	8,820	0,404	28,1

за  $\langle u \rangle$  из канала, вычисленные по значениям давления газа в центре исследуемого канала на оси ( $z/d = 3$ ) и значениям диаметра цилиндрического канала  $d$  (см. рис. 1).

На рис. 2,б представлено распределение числа Маха  $M$  вдоль оси модели при различных режимах течения. Отметим, что минимальные значения  $M$  имеют место в области вдува газа, а именно при  $z/d = 4,3 \div 4,5$ . По разные стороны от этого интервала значений  $z/d$  происходит разгон газового потока до сверхзвуковых скоростей на выходах из канала нейтрализатора, причем при различных режимах течения число Маха изменяется по-разному. Так, в промежуточном режиме течения ( $\text{Kn} = 0,108$ ) по мере приближения к выходному сечению число Маха вдоль оси нейтрализатора монотонно возрастает. Скачкообразные изменения числа Маха наблюдаются уже при  $\text{Kn} = 2,4 \cdot 10^{-2}$  в направлении, противоположном эжекции газа. При континуальном режиме течения ( $\text{Kn} = 4,2 \cdot 10^{-3}$ ) имеет место скачкообразное распределение числа Маха вдоль оси нейтрализатора в обоих направлениях. Из рис. 2,б следует, что в выходных сечениях ( $z/d = 0$ ) наименьшее значение числа Маха достигается в промежуточном режиме течения ( $\text{Kn} = 0,108$ ), а наибольшее — в континуальном режиме течения ( $\text{Kn} = 4,2 \cdot 10^{-3}$ ). Погрешность измерения чисел Маха  $M > 1$  не превышает 6 %, а чисел Маха  $M < 1$  — 13 %. При  $\text{Kn} = 0,108$  погрешность определения значения  $P_{st}/(NkT)$  не превышает 5 %; при  $\text{Kn} < 0,1$  — 4 %.

Для определения потока  $N_-$  молекул углекислого газа, истекающих в единицу времени через выходное сечение канала в направлении, противоположном эжекции, проводились отдельные измерения массы газа, конденсирующегося в течение определенного промежутка времени на поверхности криопанели в камере, подключенной к соответствующему выходному сечению (см. рис. 1).

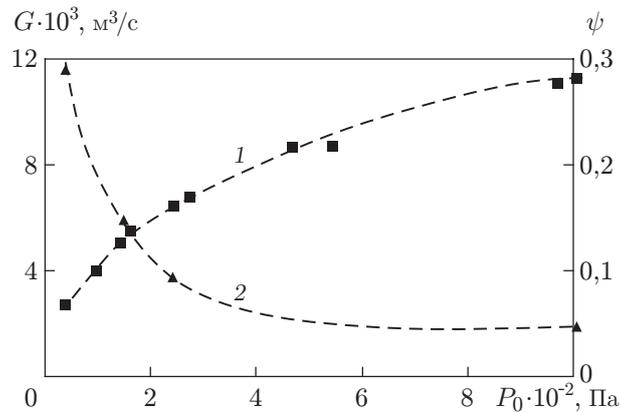


Рис. 3. Зависимость объемного расхода  $G$  (1) и коэффициента разделения потока  $\psi$  (2) от давления газа в ресивере  $P_0$

На рис. 3 представлены результаты измерения полного расхода газа, вытекающего из нейтрализатора с газовым эжектором,  $G = NkT_0/P_0$  и расхода молекул  $N_-$  в направлении, противоположном эжекции, в виде зависимости коэффициента разделения потока  $\psi$  от давления газа в ресивере  $P_0$ . Видно, что с увеличением давления торможения коэффициент разделения потока  $\psi$  уменьшается. Это обусловлено увеличением объемного расхода (скорости истечения газа) и числа молекул, движущихся в направлении эжекции, за счет действия вязких сил.

Использование нейтрализатора с газовым эжектором позволяет существенно уменьшить среднюю скорость движения молекул газовой мишени в направлении, противоположном эжекции, в континуальном режиме течения и режиме течения со скольжением при толщине газовой мишени  $\nu > 10^{16}$ , что обусловлено значительным увеличением объемного расхода газа  $G$  (см. рис. 3). В результате в рассматриваемой области режимов течения наблюдается перенос молекул газа преимущественно в направлении эжекции за счет действия сил внутреннего трения. Отметим, что газодинамическую эффективность нейтрализатора с газовым эжектором можно увеличить путем увеличения толщины газовой мишени. Для этого используются следующие способы:

- 1) установка на торце цилиндрического канала шайбы с внутренним диаметром, равным диаметру эжектора;
- 2) организация вдува газа вблизи выходного сечения цилиндрического канала;
- 3) уменьшение длины эжектора.

Однако при реализации каждого указанного способа будут увеличиваться коэффициент разделения потока и средняя скорость молекул в направлении, противоположном эжекции.

В заключение отметим, что существенным фактором, оказывающим влияние на эффективность работы нейтрализатора, является постоянство статического давления в поперечном сечении газовой мишени. Исследования показали, что наименьшее отклонение от постоянного давления имеет место в промежуточном режиме течения, а наибольшие изменения давления в поперечнике происходят в континуальном режиме течения. По-видимому, это обусловлено тем, что при малых числах Кнудсена внутри нейтрализатора формируются газодинамические потоки, характеризующиеся четко выраженными границами. Существенное изменение давления наблюдается в сечениях, ограничивающих поверхности вдува газа или расположенных в области интенсивного вдува газа (для данной модели при  $z/d = 3,3; 5,0$ ). Наиболее значительные изменения статического давления наблюдаются в выходных сечениях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
2. **Цейтлин А. Б.** Пароструйные вакуумные насосы. М.; Л.: Энергия, 1965.
3. **Rothe D. E., de Leew I. H.** The free molecular impact pressure probe of arbitrary length // AIAA J. 1963. V. 1, N 9. P. 220–221.
4. **Херлбут Ф. С.** Методика измерений, визуализация течения // Газодинамика разреженных газов. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. С. 100–123.

*Поступила в редакцию 30/VI 2011 г.,  
в окончательном варианте — 5/XII 2011 г.*

---