

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

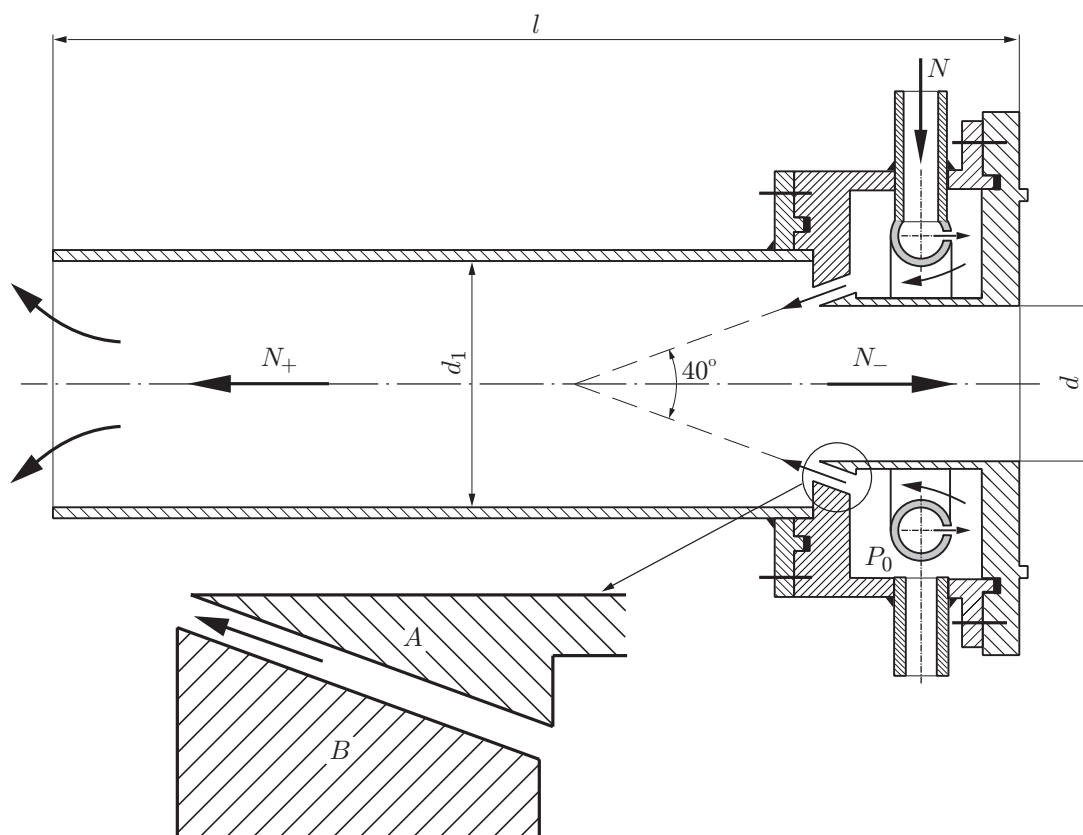


Рис. 1. Схема нейтрализатора с газовым эжектором ($l = 240$ мм, $d = 40$ мм):
внизу — сечение звукового сопла

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 $Kn = \lambda/d = 0,1 \div 5,0$ (λ — 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 ν , газодинамической эффективности нейтрализатора τ , скорости истечения углекислого га-

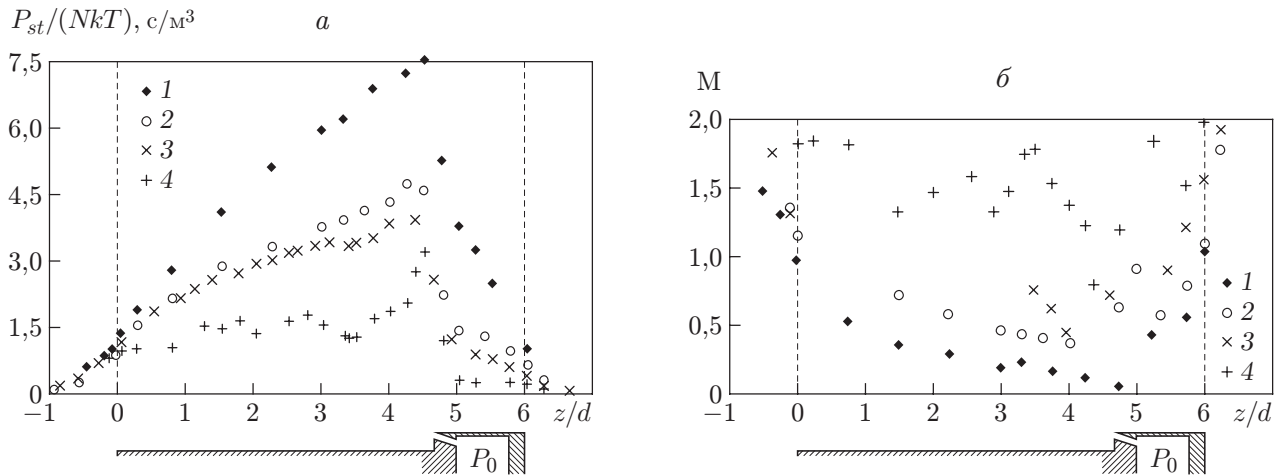


Рис. 2. Распределения статического давления (*а*) и числа Маха (*б*) вдоль оси модели:
 1 — $\text{Kn} = 0,108$; 2 — $\text{Kn} = 1,37 \cdot 10^{-2}$; 3 — $\text{Kn} = 2,41 \cdot 10^{-2}$; 4 — $\text{Kn} = 4,2 \cdot 10^{-3}$;
 штриховые линии — границы канала нейтрализатора

Основные газодинамические параметры модели нейтрализатора с газовым эжектором

P_0 , Па	$N \cdot 10^{-20}$, c^{-1}	ψ	Kn	$\nu \cdot 10^{-16}$, 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).

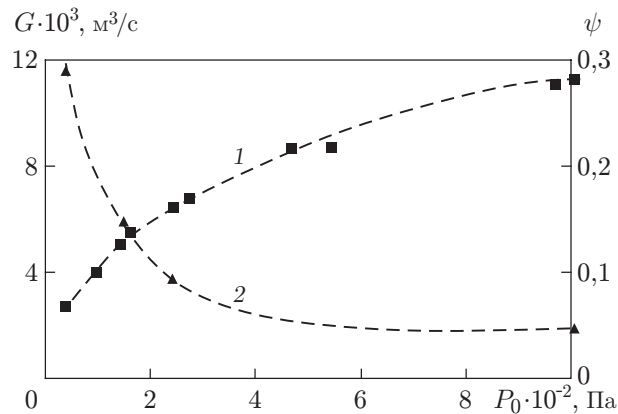


Рис. 3. Зависимость объемного расхода G (1) и коэффициента разделения потока ψ (2) от давления газа в ресивере P_0

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 ψ от давления газа в ресивере P_0 . Видно, что с увеличением давления торможения коэффициент разделения потока ψ 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.*
