

Используя (8), найдем величину плотности столба молекул газовыделения

$$\frac{D}{n_0 R} = \int_0^{\infty} \left(1 - \sqrt{1 - \left(1 + \frac{r}{R} \right)^{-2}} \right) d\left(\frac{r}{R}\right) = \\ = \lim_{A \rightarrow \infty} \left(A - \sqrt{(1+A)^2 - 1} + \arccos \frac{1}{1+A} \right) = \frac{\pi}{2} - 1$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коган М. Н. Динамика разреженного газа. Кинетическая теория. М.: Наука, 1967.
440 с.

Москва

Поступила в редакцию
18.IV.1990

УДК 533.697.2 : 532.525.2

© 1991 г.

С. Ю. КРАПЕНИННИКОВ, И. Р. МИКЛАШЕВСКИЙ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СТРУИ ИЗ ТОНКОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЩЕЛИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ ВОКРУГ ВОЗДУХОЗАБОРНИКА

Излагаются результаты экспериментального исследования струйного течения, возникающего при распространении конической струи из тонкой щели, расположенной по периферии всасывающего отверстия. Исследовалась перестройка струйного течения, связанная с возникающей трехмерной структурой течения. Предложена схема течения.

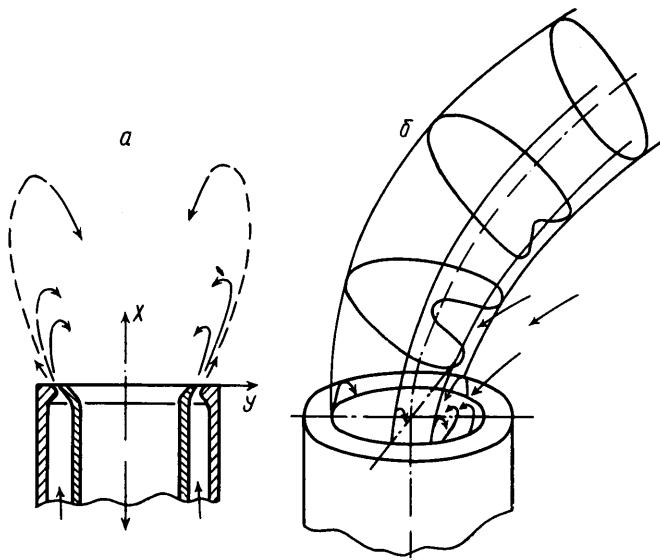
В [1, 2] исследовались струи, распространяющиеся из кольцевого сопла с заглушенной центральной частью или с выдувом газа в центральную часть сопла. В том случае, когда подвод газа в центральную часть сопла невелик или отсутствует, давление в центральной зоне кольцевой струи существенно снижается, из-за чего струя сильно искривляется и вблизи сопла образуется внутренняя зона обратных токов. При отсосе газа через центральную часть сопла также должна возникать подобная картина течения, однако описания такого рода течений в литературе не встречаются.

1. В данной работе рассматривалась возможность применения кольцевой струи в качестве экрана, ограничивающего попадание нежелательной примеси, распределенной в окружающем воздухе, во всасывающий канал. Струя, вытекающая из кольцевого сопла, экранирует отверстие всасывающего канала и препятствует попаданию в него воздуха из области, расположенной вблизи сопла. Картина такого течения и схема установки, на которой проводились исследования, приведены на фиг. 1, а.

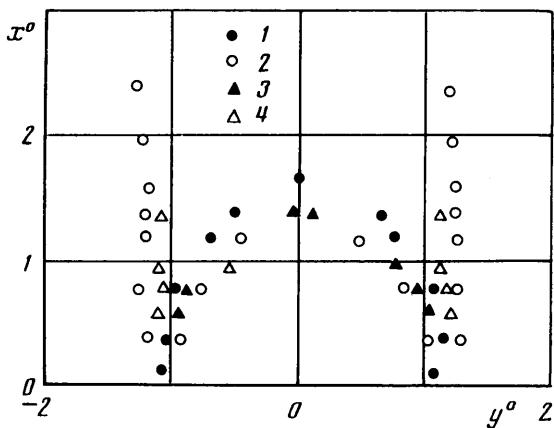
Установка представляет собой всасывающий патрубок круглого сечения диаметром 40 мм и сужающееся кольцевое сопло шириной 0,5 мм с радиусом кольца $R=25$ мм. Скорость воздуха на входе в патрубок составляла 0–40 м/с $\pi(\lambda_b)=1-0,94$, где λ_b – приведенная скорость в воздухозаборном патрубке, $\pi(\lambda)$ – газодинамическая функция). Струя из кольцевого сопла вытекала при критическом и сверхкритическом перепадах давления ($\pi_c=p_c^*/B_0=2,0-3,5$, где p_c^* – полное давление воздуха в сопле B_0 – давление в окружающем воздухе [3]). Воздух в струе «помечался» небольшой добавкой гелия, объемная концентрация которого не превышала 10%. Эксперименты проводились с тремя различными соплами с центральным углом $\alpha=0, 40, 80^\circ$. При истечении из сопла с углом $\alpha=80^\circ$ струя прилипала к поверхности модели и образовывала пристенную веерную струю на торцевой поверхности модели.

2. Эксперименты, проведенные с соплами с углами $\alpha=0, 40^\circ$, показывают: для диапазона параметров истечения струи $1 < \pi_c \leq 3,5$ и при разрежении в воздухозаборнике, соответствующем $\pi(\lambda_b)=1-0,94$, в зависимости от соотношения расходов воздуха через воздухозаборник и кольцевое сопло, реализуются три различные схемы течения.

Расход воздуха через воздухозаборник значительно меньше расхода воздуха через сопло. В этом случае течение качественно не отличается от течения, описанного в [2]. Кольцевая струя на больших удалениях от модели переходит в обычную затопленную струю. На фиг. 2 приведены экспериментальные данные о положении



Фиг. 1

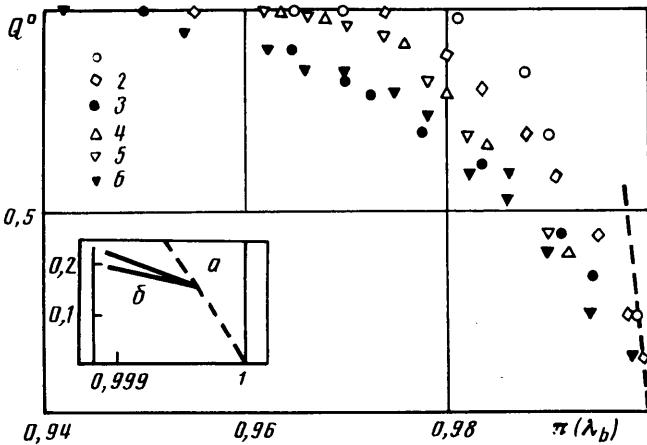


Фиг. 2

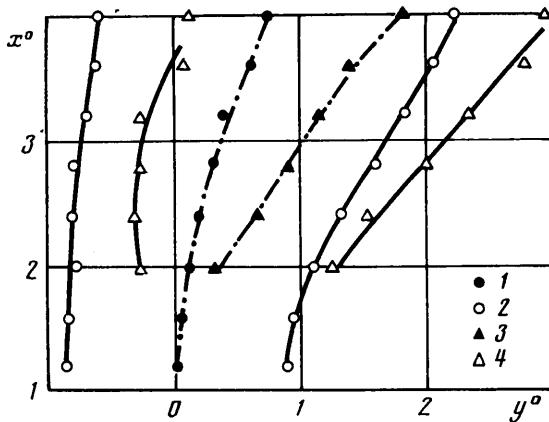
линиях максимальной скорости (1, 3) и границ струи (2, 4) в координатах $x^\circ = X/R$ и $y^\circ = Y/R$ при $\pi(\lambda_b) = 1$ и $0,9999$, границы струи здесь определены как линии, где продольная скорость струи составляет 10% от максимальной скорости в данном сечении струи.

В случае значительного разрежения в воздухозаборнике, при $\pi(\lambda_b) \leq 0,94$, струя под действием большого градиента давления в радиальном направлении практически сразу разворачивается и полностью попадает в воздухозаборник, дальность струи при этом не превышает $(0,5-1)R$.

При умеренном соотношении расходов воздуха через воздухозаборный патрубок и через кольцевое сопло реализуется некоторый промежуточный вариант течения, в котором только часть воздуха из струи попадает в патрубок, а часть продолжает движение в направлении истечения из сопла, это иллюстрируют экспериментальные данные на фиг. 3, где приведены результаты измерения относительного расхода гелия Q° , подмешиваемого в струю и попадающего в воздухозаборник. Данные получены в экспериментах с соплом с углом $\alpha=0$ при $\pi_c=2,33; 2,7; 3,39$ (1-3) и с углом $\alpha=40^\circ$ при $\pi_c=2,43; 2,95; 3,35$ (4-6). По данным фиг. 3 можно определить диапазон соотношения параметров струи и потока в воздухозаборнике, при которых реализуется рассматриваемый промежуточный вариант течения. В этом случае кольцевая структура начальной зоны струи разрушается и в воздухозаборный патрубок попадает воздух из области, лежащей вне струи. Однако часть воздуха выносится



Фиг. 3



Фиг. 4

струей из зоны взаимодействия с воздухозаборником, и на некотором расстоянии от модели ($x^o \geq 3$) формируется течение, близкое по характеру к течению в осесимметричной струе, но с несколько искривленной осью. На фиг. 4 приведены данные о положении оси (1, 3) и границ (2, 4) этой струи при $\pi_c = 3,43$ и $\pi(\lambda_b) = 0,98$ и $0,96$. При увеличении разрежения в воздухозаборном патрубке ось этой струи искривляется сильнее, а наклон ее увеличивается, продольная скорость на оси струи на тех же расстояниях от модели уменьшается.

Приведенные данные позволяют предположить, что при этом осуществляется схема течения, представленная на фиг. 1, б. При увеличении разрежения в воздухозаборном патрубке расход воздуха через него увеличивается, на небольшом расстоянии от плоскости входа в патрубок ($x^o < 2$) кольцевая структура струи разрушается и часть струи из сектора с углом $\sim 90^\circ$ практически сразу разворачивается и попадает в воздухозаборник. Остальная часть воздуха, вытекающего из кольцевого сопла, распространяется в направлении истечения и, как показывают измерения, на некотором удалении ($x^o \geq 3$) перестраивается в струю круглого сечения с изогнутой осью и с обычным струйным распределением продольной скорости воперечных сечениях.

В воздухозаборный патрубок воздух затекает через образовавшийся «прорыв» в кольцевой структуре струи. Этот прорыв стабилизируется в определенном месте, что обусловлено, по-видимому, малыми отклонениями геометрических параметров кольцевого сопла. Для подтверждения существования прорыва струи был поставлен специальный эксперимент. С разных сторон от модели на расстоянии $l = 3R$ от ее оси и при $x^o = 1$, $\varphi = vag$ из тонкой трубы подавался гелий с постоянным расходом. При этом фиксировалась концентрация примеси гелия в воздухозаборнике. Определенные по результатам этого эксперимента относительные значения расхода гелия Q^o , поступающего в воздухозаборник, приведены ниже.

π_c	$\varphi = -\pi/2$	0	$\pi/2$
2,4	0,59	0,95	0,62
3,5	0,34	0,91	0,38

Опытные данные подтверждают существование прорыва с одной стороны струи.

3. Рассмотрим процесс возникновения прорыва струи. При включении отсоса через воздухозаборный патрубок кольцевая струя разделяется и часть воздуха из струи разворачивается и попадает в воздухозаборник. При малом отсосе прорыв струи не возникает и расход воздуха через воздухозаборник равен некоторой части расхода воздуха через кольцевое сопло. На фиг. 3 штриховой линией приведена расчетная кривая зависимости отношения расхода газа струи, попавшего в воздухозаборник, к начальному расходу от скорости движения воздуха в воздухозаборном патрубке при $\pi_c=3$ в случае отсутствия прорыва струи. Из сравнения с экспериментальными данными, приведенными на этом же графике, следует, что течение без прорыва осуществлялось в экспериментах при малых значениях скорости отсоса ($\pi(\lambda_b) \leq 0,9998$), если $\pi_c=2-3,5$.

На поле фиг. 3 эта же кривая (б) приведена совместно с аппроксимацией экспериментальных данных (а) в увеличенном масштабе. Видно, что переход от режима без прорыва струи к режиму с прорывом происходит в опытах при $\pi(\lambda_b)=0,9998$, т. е. при $u_b/u_c=0,01-0,02$, где u_b — скорость воздуха на входе в патрубок, u_c — начальная скорость струи. Таким образом, «порогом» возникновения «прорыва» в тонкой кольцевой струе можно приближенно считать превышение скорости в воздухозаборнике над скоростью втекания в струю на ее границе $u_b \geq v_b$, где $v_b \approx 0,01 u_c$ — уровень скорости втекания в струю [4].

Для выяснения зависимости между размерами зоны прорыва струи, параметрами в воздухозаборном патрубке и параметрами истечения струи требуются дополнительные исследования, однако на основании имеющихся данных можно предположить, что размеры этой зоны увеличиваются с увеличением скорости в воздухозаборном патрубке и с уменьшением скорости истечения струи.

Таким образом, осесимметричная (двумерная) картина течения реализуется либо при малом отсосе через воздухозаборник, когда кольцевое струйное течение не разрушается, а трансформируется в обычную затопленную струю, либо при большом отсосе, когда струйное течение не реализуется. В промежуточных случаях двумерное течение разрушается и становится трехмерным.

Выявленная схема течения и данные экспериментов показывают, что тонкая кольцевая струя, выдуваемая по окружности воздухозаборного патрубка, не отделяется от воздухозаборника область, из которой в него попадает воздух. Эта струя не выполняет экранирующей роли из-за возникновения «прорыва». При этом происходит перераспределение засасываемого воздуха, о котором можно судить по данным таблицы и фиг. 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 716 с.
2. Крашенинников С. Ю., Рогальская Е. Г. Распространение струй из прямоугольных сопл, свободных и вблизи экрана // Изв. АН СССР. МЖГ. 1979. № 4. С. 39–48.
3. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
4. Абрамович Г. Н., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н., Смирнова И. П. Турбулентное смещение газовых струй. М.: Наука, 1974. 272 с.

Москва

Поступила в редакцию
23.V.1990