

ГОГИШ Л. В., ИВАНОВ О. Н., ПИНКЭ И. М., САБУРОВ С. И.,  
 ФОЛОМЕЕВ Е. А., ШВЕЦ А. И.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВДУВА ГАЗА В ДОННУЮ ПОЛОСТЬ

Представлены результаты экспериментального исследования различных способов воздействия на течение в ближнем следе с помощью вдува системы струй и изменения конфигурации кормовой части при числе Маха  $M=3$ . Исследована структура донного течения и пульсации давления за осесимметричным телом с донной полостью при вдуве круглой и кольцевой струй газа. Проведено сравнение с данными для тел с плоским донным торцом.

В настоящее время накоплен обширный материал по сверхзвуковым отрывным течениям в донной области тел вращения с плоским торцом с учетом струйного и распределенного вдува [1, 2], который применяется для повышения донного давления и предотвращения воздействия возвратных течений на кормовую часть тела. Наиболее эффективен распределенный вдув, однако его трудно реализовать. Если в кормовой части тела имеется внутренняя полость, то картина отрывного течения может заметно измениться, особенно если эта полость имеет сложную конфигурацию.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование сверхзвукового отрывного течения за телом вращения с кормовой частью при наличии «слабого» вдува круглой и кольцевой струй через центральные отверстия и кольцевую щель. Оно проводилось при отношении скоростных напоров вдуваемого газа и набегающего потока  $K=0-0,025$ .

1. Описание модели и методики экспериментов. На фиг. 1 приведена схема рабочей части аэродинамической трубы с моделью тела вращения, которая представляла собой обтекатель 1 в виде цилиндра с конической головной частью. Длина цилиндра 220 мм, диаметр 90 мм, угол конуса  $42^\circ$ . Внутри обтекателя располагалась камера 2 с соплом, сверхзвуковая часть которого была дренирована трубками отбора статического давления 3. В проекции на ось модели длина дренированного участка  $l$  составляла 70 мм, шаг между трубками — 6,5 мм. В критическом сечении сопла располагался датчик пульсаций давления 4. Обтекатель крепился к телу трубы с помощью полого пилона 5, через который поступал воздух для вдува через кольцевую щель между кромками сопла и обтекателя. Воздух для вдува через критическое сечение сопла подавался через трубку 6. Система вдува воздуха состояла из двух независимых магистралей с жиклерами, манометрами для измерения расхода и регулирующими кранами. Для измерения распределения полных давлений за моделью располагались гребенки насадков полного давления 7, содержащие также насадок статического давления, расположенный вдоль оси модели.

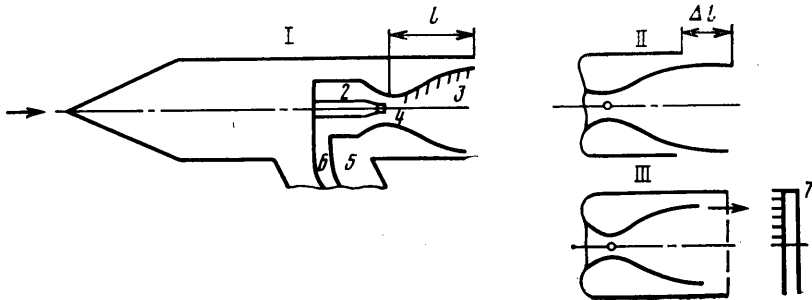
Было испытано три варианта кормовой части. Первый из них имел кольцевую щель вдува ( $\Delta R=2,5$  мм), расположенную в плоскости торца сопла ( $R=41,5$  мм) (модель I). Во втором варианте (модель II) кольцевая щель вдува была выполнена с уступом ( $\Delta l=21$  мм) по аналогии с моделью, испытанной в [3]. И наконец, третий вариант (модель III) — с сеткой, обеспечивающей наибольшую равномерность вдува по торцу модели, был исследован с методической целью.

В процессе эксперимента при каждом пуске с фиксированным расходом вдува через критическое сечение сопла или кольцевую щель производилась запись распределения статического давления вдоль сверхзвуковой части сопла, показаний датчика пульсаций и искровое фотографирование потока в донной области через прибор ИАБ-451.

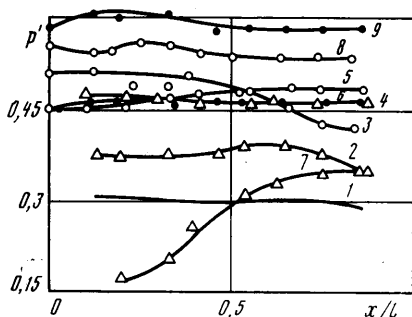
2. Исследования давления. На фиг. 2 приведено распределение давления вдоль образующей сверхзвуковой части сопла  $p'=f(x/l)$  в зависимости от способа вдува и параметра вдува  $I=G_i/S_m(\rho u)_\infty$ , где  $p'=p/p_\infty$ ,  $G_i$  — массовый расход вдува,  $S_m = \pi/4 \cdot D^2$  — площадь мидела модели ( $I=I=0$ ; 2, 3 — модель III; 4–6 — модель II; 7–9 — модель I; 2, 4, 7 — вдув через камеру  $I_k \approx 0,01$ ; 3, 5, 8 — вдув через щель  $I_s \approx 0,01$ ; 6 —  $I_k = 0,004$ ;  $I_s = 0,006$ ; 9 —  $I_k = 0,007$ ,  $I_s = 0,008$ ). Для модели III с сеткой вдув через критическое сечение менее способствует повышению донного давления, чем вдув через кольцевую щель. Для модели II, где кольцевая щель вдува была выполнена с уступом, минимальное донное давление реализуется при вдуве через критическое сечение; вдув через щель занимает промежуточное положение, и наиболее эффективным оказывается комбинированный вдув.

Было обнаружено явление отрыва и присоединения круглой струи в сопле Лавала для модели I, которое возникает при  $I_k \geq 0,01$ . При наличии дополнительного вдува через кольцевую щель это не наблюдается.

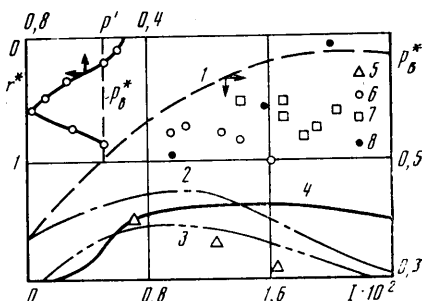
На фиг. 3 представлена зависимость среднего донного давления  $p_b^* = \langle p_b \rangle / p_\infty$  от параметра вдува  $I$ , кривые 1–4 заимствованы с фиг. V.15 и V.39 из [1] и относятся к вдуву в донный торец аналогичного тела вращения при  $M=3$  (1 — распределенный вдув; 2 и 3 — вдув в торец с ограниченной проницаемостью; 4 — вдув через кольцевую щель, близко по параметрам к модели II, исследованной в на-



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

стоящей работе; данные 5-7 соответствуют модели I; 8 - модели III; 5 - вдув через камеру; 6 и 8 - вдув через щель (модели I и III); 7 - комбинированный вдув). Из полученных результатов следует, что комбинированный вдув оказывается более эффективным, чем щелевой, и приближается к распределенному вдуву.

Величина относительного донного давления  $p_b' = p_b/p_\infty$  определялась также по измеренному на фотографиях течения углу отклонения граничной линии тока  $\delta$  и формуле Прандтля-Майера. Наблюдалось удовлетворительное совпадение с точностью до 10-15% между двумя независимыми способами определения величины  $p_b'$ . На фиг. 3 сверху для примера показано распределение давления по радиусу донного среза, измеренное насадками полного давления за моделью I при вдуве через кольцевую щель ( $I=0,01$ ),  $r^* = r/R$  - относительный радиус донного среза.

**3. Пульсации давления.** Рассмотрим результаты экспериментальных исследований пульсаций давления в критическом сечении сопла при вдуве воздуха через камеру ( $G_k$ ) и через щель ( $G_s$ )

$$L = 20 \lg \langle p^2 \rangle^{0.5} / p_0, \quad \langle p^2 \rangle = \int_0^\infty \langle p^2(f) \rangle df$$

Здесь  $L$  - суммарный уровень пульсаций давления,  $\langle p^2(f) \rangle$  - спектральная плотность;  $f$  - частота;  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па - нулевой уровень пульсаций давления.

На фиг. 4 ( $M=3$ ; точки 1, 2, 4 - модель I; 3 - модель II; 1 - вдув через камеру; 2, 3 - комбинированный вдув) представлены зависимости суммарного уровня пульсаций давления  $L$  от приведенного расхода воздуха  $I_k$  через камеру. Пульсации давления монотонно возрастают с увеличением расхода.

По величинам приведенного статического давления в сужающейся части сопла  $p_{10}/p_\infty$  и приведенного полного давления воздуха  $p_{0k}/p_\infty$ , вдуваемого через камеру, определялась газодинамическая функция  $\pi(\lambda) = p_{10}/p_{0k}$ , соответствующие этой функции значения параметров и расход воздуха через камеру

$$M_{10}(\lambda) = \frac{V_{10}}{C_{10}}, \quad \varepsilon_{10}(\lambda) = \frac{\rho_{10}}{\rho_{0k}}, \quad \tau_{10}(\lambda) = \frac{T_{10}}{T_{0k}}$$

$$G = M_{10} \varepsilon_{10} S_{10} p_{0k} \sqrt{\frac{\kappa \tau_{10}}{RT_{0k}}}$$

Полученный в соответствии с этой формулой расход  $G$  сравнивался с экспериментальной величиной  $G_k$ . Анализ зависимости отношения  $G/G_k$  от динамического напора в узком сечении сопла, который находился по соотношению  $1/2\rho_{10}V_{10}^2 = 1/2\kappa p_{10}M_{10}^2$ , показал, что в сужающейся части сопла течение воздуха мало отличается от изоэнтропического.

Определялись числа Маха в критическом сечении сопла  $M_{10}$  и на выходе из щели  $M_s$  в зависимости от приведенных расходов воздуха через камеру  $I_k$  и щель  $I_s$  соответственно. В отличие от  $M_{10}$  величина  $M_s(\lambda)$  находилась только по измеренным значениям расхода воздуха через щель  $G_s$  и полного давления  $p_{0s}$  в соответствии с выражением для газодинамической функции

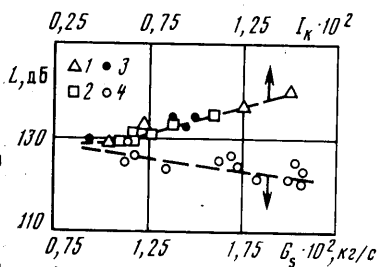
$$q(\lambda) = \frac{\sqrt{RT_{0s}} G_s}{m_s S_s p_{0s}}, \quad m_* = \sqrt{\kappa \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^a} = 0,6843, \quad a = \frac{(\kappa+1)}{(\kappa-1)}$$

где  $T_{0s} = 300$  К — температура заторможенного потока воздуха через щель,  $S_s$  — площадь поперечного сечения щели.

Расчеты показали, что при всех режимах работы число  $M_s$  соответствует дозвуковому истечению воздуха из щели, причем для модели I его значение ( $M_s = 0,35-0,4$ ) практически не зависит от расхода воздуха и экспериментальные точки имеют небольшой разброс. В случае модели II с увеличением  $I_s$  заметно растет число  $M_s = (0,1-0,3)$ , а разброс экспериментальных точек увеличивается примерно до 30%.

На всех режимах работы в критическом сечении сопла число  $M_{10}$  соответствует сверхзвуковому течению газа. Это объясняется тем, что в сужающейся части сопла находится узел с датчиком пульсаций давления. Вследствие этого критический режим ( $M=1$ ) достигается в сечении, расположенном вверх по потоку от критического сечения сопла.

При сверхзвуковом течении воздуха пульсации давления не распространяются вверх по потоку и зависят только от параметров вдуваемого воздуха. Обработка результатов экспериментов, представленных на



Фиг. 4

фиг. 4, показала, что величина пульсаций пропорциональна динамическому напору и достигает примерно 1%. Этот уровень пульсаций значительно меньше уровней пульсаций, приведенных в [3]. Так, уровень пульсаций в прямом канале составляет около 4%, а в канале с диафрагмой может достигать до 100% от динамического напора.

Рассмотрим теперь пульсации давления, соответствующие режимам  $I_k = 0$ . В этом случае пульсации, зародившиеся во внешнем потоке, могут распространяться в расширяющейся части сопла и быть зафиксированы датчиком пульсаций давления. Результаты этих исследований также представлены на фиг. 4 (вдвух через щель; 4 — модель I) в виде зависимости

уровня пульсаций от массового расхода воздуха через щель.

Видно, что увеличение расхода воздуха оказывает демпфирующее действие на уровень пульсаций давления внутри сопла.

В результате экспериментальных исследований сверхзвукового обтекания кормовой части тела вращения с донной полостью установлено, что величина среднего донного давления примерно равна давлению за телом с плоским донным торцом. При вдвух в донную область тонкой кольцевой струи, расположенной по периметру донной области, повышение донного давления интенсивнее, чем при вдвух круглой струи вдоль оси симметрии тела. Наиболее эффективен комбинированный вдвух кольцевой и круглой струй, приводящий при  $M_\infty = 3$  к повышению донного давления в 2 раза. Обнаружено влияние вдвух круглой струи на суммарный уровень пульсаций давления в донной полости, который пропорционален динамическому напору и составляет от него около 1%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Швец А. И., Швец И. Т. Газодинамика ближнего следа. Киев: Наук. думка, 1976. 380 с.
2. Гогин Л. В., Степанов Г. Ю. Турбулентные отрывные течения. М.: Наука, 1979. 367 с.
3. Руденко А. Н., Эпштейн В. Л., Ильченко М. А. Возбуждение колебаний в дозвуковых потоках // Газодинамика воздушно-реактивных двигателей: Тр. ЦИАМ. 1984. № 1093. С. 188-199.

Москва

Поступила в редакцию  
17.II.1988