

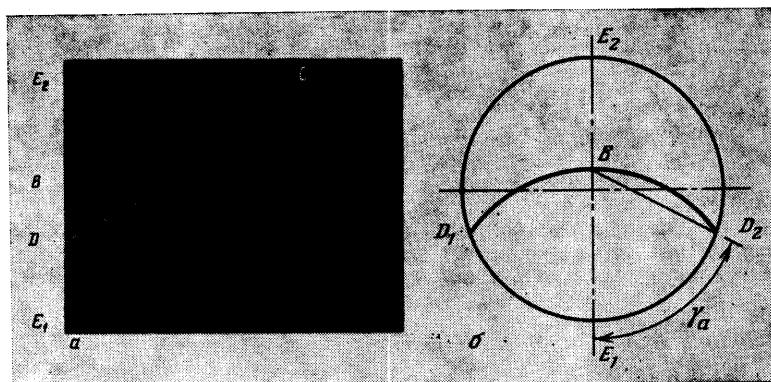
УДК 533.697.4

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ НА КОЭФФИЦИЕНТ
УСИЛЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ВДУВЕ ГАЗА
В СОПЛО ЛАВАЛЯ

ЗЕЛЕНЦОВ В. В., КРЕМНЕВ В. П., НЕСТЕРОВ А. А.,
ПОРОДЕНКО В. В., ПИШКОВ А. А.

При несимметричном вдуве газа в сверхзвуковую часть сопла реализуется возмущение основного потока вдуваемой струей. Различают два режима взаимодействия. При первом возмущение основного потока не распространяется на противоположную вдуву сторону сопла; центральный угол охвата возмущением выходного сечения сопла $2\gamma_a < 180^\circ$ (фиг. 1). Такой режим характеризуется отсутствием влияния кривизны сопла на величину боковой силы. При втором режиме зона возмущенного течения распространяется на противоположную вдуву сторону сопла ($2\gamma_a > 180^\circ$), что приводит к уменьшению градиента боковой силы по расходу вдуваемого газа. Наиболее подробно исследован первый режим.

Экспериментальные данные работы [1] свидетельствуют о малом влиянии формы и количества отверстий в узле инжекции, через которые осуществляется



Фиг. 1

вдув, а также расстояния между ними на величину коэффициента усиления K , представляющего собой отношение полной боковой силы F к тяге вторичной струи в вакууме F_0 при несимметричном вдуве газа в сопло Лавалья.

В работе [2] исследовалось влияние на коэффициент усиления расположения инжектора по длине сверхзвуковой части сопла при вдуве вторичного газа через одиночные цилиндрические отверстия различного диаметра d . Экспериментальные данные по коэффициенту усиления были обобщены в единую кривую ([2], фиг. 1) в безразмерных координатах $K^\circ = K/K_a$, L_1/d (K — текущее значение коэффициента усиления, K_a — значение коэффициента усиления при вдуве газа через отверстие, расположенное в непосредственной близости от выходного сечения). Указанные данные получены при сочетаниях параметров G_2° , α и L_1° , обеспечивающих выполнение условия $2\gamma_a < 180^\circ$. Здесь $G_2^\circ = G_2/G_1$ — относительный массовый расход вдуваемого газа, G_1 — расход газа через основное сопло, α — угол между осью канала вдува и осью основного сопла, $L_1^\circ = L_1/L$ — относительное расстояние между сечением вдува и выходным сечением сопла, L — длина сверхзвуковой части сопла.

Течение в сопле со вдувом газа при распространении возмущения на противоположную вдуву сторону сопла ($2\gamma_a > 180^\circ$) имеет ряд особенностей, определяющих

специфику влияния расположения отверстий вдува по длине сопла и в узле инжекции на коэффициент усиления.

В данной работе, являющейся продолжением работы [2], экспериментально определялся коэффициент усиления при вдуве поперечной газовой струи в сверхзвуковую часть осесимметричных сопел при различном расположении отверстий по длине сопла и в узле инжекции на режимах, характеризующихся распространением возмущения на противоположную вдуву сторону сопла.

1. Методика испытаний. Исследования проводились на дифференциальной установке Сергиенко А. А., описанной в работе [3], и на сверхзвуковой аэродинамической установке с открытой рабочей частью. В качестве основного и вдуваемого газов использован неподогретый воздух. Испытывалось несколько типов сопел, отличающихся диаметром минимального сечения d_* , числом Маха одномерного течения в выходном сечении сопла M_a , относительной длиной сверхзвуковой части $L^\circ = L/r_*$, $r_* = d_*/2$ и контуром ее. Различными были параметры узлов вдува α , d , L_1° , количество и расположение отверстий в инжекторе. Параметры сопел, использованных для определения влияния расположения отверстий по длине сопла на коэффициент усиления, приведены в работе [2] (сопла № 1–4). Влияние расположения отверстий в инжекторе на коэффициент усиления исследовалось на сопле № 5, имеющем профилированную сверхзвуковую часть с коническими продолжениями, на которых располагаются узлы вдува. Основные параметры сопла: $d_* = 35,96$ мм, геометрическая степень расширения $r_a^\circ = r_a/r_* = 2,06$ (r_a — радиус выходного сечения), $L^\circ = 7,7$; $M_a = 3,0$.

Узлы вдува представляют собой систему отверстий, состоящую из цилиндрического отверстия диаметром 10 мм для формирования основной вдуваемой струи и расположенных вниз по потоку нескольких вариантов отверстий для поддува газа в область следа основной струи: a — шесть отверстий $d = 2$ мм, расположенных треугольником в последовательности 3, 2, 1, расстояние между осями основного и последнего отверстий 20 мм; b — одно цилиндрическое отверстие $d = 5$ мм, расстояние между осями отверстий 15 мм; c — 24 отверстия $d = 1$ мм, равномерно заполняющих прямоугольник размером 10×15 мм, расстояние между осями основного отверстия и последнего ряда отверстий 20 мм. Основное отверстие вдува расположено на расстоянии $L_1^\circ = 0,45$ от среза сопла.

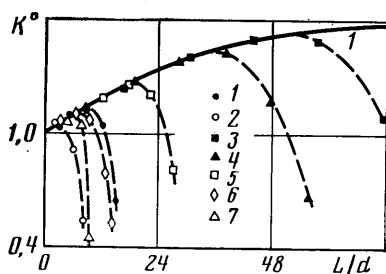
Газ для вдува через основное отверстие отбирался из рабочего цилиндра дифференциальной установки, поэтому давление вдува примерно равнялось давлению перед соплом. Расход вдуваемого через это отверстие газа G_{21} регулировался площадью критического сечения канала вдува. Газ для поддува в область следа подавался из автономного источника, расход его G_{22} регулировался давлением.

Для исследования характеристик течения при взаимодействии вдуваемой струи с основным потоком осесимметричное профилированное сопло дренировано по всему полю возмущенного течения (сопло № 6) и имеет следующие значения характерных параметров: $d_* = 73,16$ мм, $r_a^\circ = 2,75$, $L^\circ = 7,78$, $M_a = 3,6$. Отверстия вдува расположены в середине сверхзвуковой части сопла ($L_1^\circ = 0,5$). Основные параметры узлов вдува: $d = 14,5$; 16,2; 23,5 мм; углы вдува $\alpha = 78^\circ$ (нормально к стенке сопла в месте вдува); $\alpha = 90^\circ$ (нормально к оси сопла); $\alpha = 120$ и 135° (навстречу основному потоку). Дренажные отверстия выполнены с шагом $(0,2-0,4) d$ между ними.

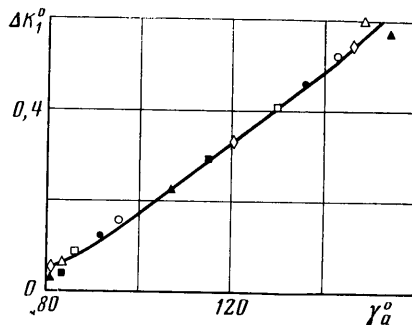
Сопла № 1–5 испытывались на дифференциальной установке, сопло № 6 — на аэродинамической установке. При испытаниях на дифференциальной установке давление перед соплами $p_0 = 3-4$ МПа, что обеспечивало безотрывное течение в соплах. При испытаниях на аэродинамической установке давление перед соплом $p_0 = 1,37$ МПа. Для исключения влияния атмосферного давления на процессы, происходящие в сопле при вдуве газа, испытания проводились с присоединением к нему цилиндрического выхлопного диффузора.

Размеры зон возмущенного течения в соплах при экспериментах определялись тремя методами: по распределению статического давления в поперечных сечениях сопла; по следам растекания визуализирующего состава на стенке сопла в зоне возмущенного течения [4]; по теплеровским фотографиям спектров потока за срезом сопла.

Определение размеров зоны возмущенного течения в выходном сечении сопла при вдуве газа по теплеровским фотографиям основано на том, что ударная волна, разделяющая поток в сопле и за ним на возмущенное и невозмущенное течения, при пересечении с границей истекающего из сопла газового потока образует из-за интенсивного изменения параметров види-



Фиг. 2



Фиг. 3

мую на снимках линию CD (фиг. 1, а). Измеряя на фотографиях диаметр выходного сечения сопла $d_0 = E_1 E_2$ и отход ударной волны от стенки со стороны вдуваемой струи $r_0 = E_1 D$, определим из геометрических соотношений (фиг. 1, б) угол γ_a

$$\gamma_a = \arccos(1 - 2r_0/d_0)$$

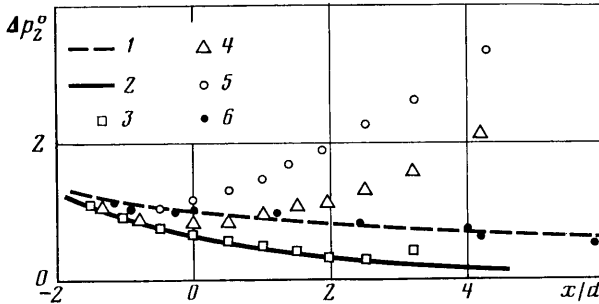
Из указанных методов определения размеров зоны возмущенного течения в выходном сечении сопла наиболее достоверен последний, однако и он может давать ошибки до 5%, особенно при $\gamma_a \approx 180^\circ$. Углы γ_a определялись для сопел № 1–5 по теплеровским фотографиям потока и следам растекания визуализирующего состава на стенке сопла, для сопла № 6 по распределению статических давлений.

2. Результаты. Кривая 1 на фиг. 2 описывает прирост коэффициента усиления за счет увеличения длины зоны возмущения, расположенной за отверстием вдува при условии незначительного влияния распространения возмущений давления в поперечных сечениях сопла на значения K , т. е. когда в выходном сечении сопла угол $\gamma_a < 90^\circ$. При $\gamma_a > 90^\circ$ коэффициент усиления уменьшается с увеличением L/d , сопровождающимся ростом γ_a (штриховые линии). Точки 1, 2 получены на сопле № 1 ($d_* = 35,85$ мм; $M_a = 3,25$; $L^\circ = 5,14$, диаметры отверстия вдува соответственно $d_1 = 4,4$ мм; $d_2 = 8,0$ мм). Точки 3–7 получены на сопле № 3 ($d_* = 40,63$ мм; $M_a = 3,25$; $L^\circ = 10,68$; $d_3 = 3,0$ мм; $d_4 = 5,0$ мм; $d_5 = 7,0$ мм; $d_6 = 9,0$ мм; $d_7 = 12$ мм). Экспериментальные данные получены при равенстве полных давлений перед отверстием вдува и перед основным соплом.

Влияние распространения возмущенной зоны в поперечных сечениях сопел на коэффициент усиления определяется величиной отклонения значений K° , лежащих на штриховых линиях, от значений K° на кривой 1 и величиной соответствующих им углов γ_a . Степень влияния поперечного распространения возмущенной зоны на значение коэффициента усиления может быть оценена с помощью зависимости $\Delta K_1^\circ(\gamma_a)$, представленной на фиг. 3 (обозначения на фиг. 3 те же, что на фиг. 2). Величина $\Delta K_1^\circ(\gamma_a)$ равна разности между значениями K° на кривой 1 и соответствующими значениями на штриховых линиях, отнесенной к значениям K° на кри-

вой 1. Каждому значению относительной разности ΔK_1° соответствует свое значение γ_a . Как видно, значения ΔK_1° достаточно кучно располагаются около некоторой кривой. С ростом γ_a падение коэффициента усиления увеличивается и достигает $\sim 50\%$ при $\gamma_a = 140-150^\circ$.

Рассмотрим особенности взаимодействия вдуваемого и основного потоков в зоне возмущенного течения, при распространении возмущения на противоположную вдуву сторону сопла. При малых значениях γ_a механизм образования боковой силы в сопле мало отличается от механизма образования ее при вдуве через пластину. В этих условиях реализуется максимальный



Фиг. 4

для данного расхода вдуваемого газа уровень боковой силы. Отклонение боковой силы (и коэффициента усиления) от максимального уровня наблюдается при угле $\gamma_a > 80^\circ$. Это связано с особенностями распределения давления в зоне возмущенного течения, ограниченного стенками сопла. Для выявления этих особенностей и оценки соотношения избыточного давления при вдуве газа через стенку сопла и через плоскую пластину были проведены исследования дренированного сопла (№ 6).

Как показали результаты экспериментальных исследований, распределения давления в поперечных сечениях сопла аналогичны известным распределениям давления при вдуве через пластину [4] и имеют два максимума. При этом максимум давления, ближний к плоскости симметрии, связан с пространственной ударной волной, образующейся при обтекании верхней части струи. Второй максимум давления находится вблизи границы возмущенного течения и связан с пространственным косым скачком уплотнения, вызывающим начальное отклонение основного потока перед вдуваемой струей. Вниз по потоку скачок уплотнения и ударная волна распространяются в стороны с уменьшением их интенсивности за счет взаимодействия с волной разрежения, формирующейся при обтекании струи основным потоком.

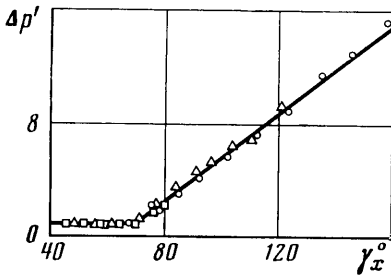
В работе [5] сделан вывод о слабом влиянии на характер течения в плоскости симметрии поперечной кривизны поверхности, через которую осуществляется вдув газа. Интенсивность повышения давления во втором максимуме $\Delta p_2^\circ = (p_2 - p_H) / p_H$ при удалении от струйного препятствия вниз по потоку (фиг. 4, точки 6) монотонно уменьшаются и при вдуве газа через плоскую пластину может быть оценена по формуле для косога скачка уплотнения

$$\Delta p_2^\circ = \frac{2\kappa}{\kappa+1} (M_H^2 \sin^2 \alpha_c - 1), \quad \alpha_c = \arctg \frac{dr}{dx} \quad (2.1)$$

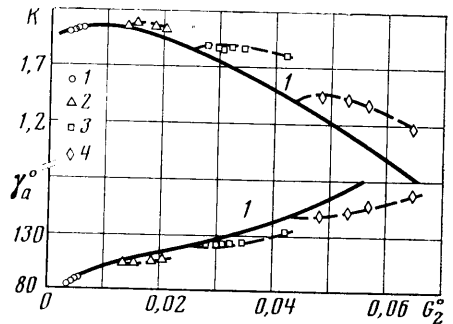
где κ — показатель изоэнтропии газа основного потока; M_H — число Маха невозмущенного потока перед скачком уплотнения; α_c — угол наклона скачка уплотнения, который определяется по уравнению ударной волны в меридиональной плоскости $r=f(x)$, p_H — давление в невозмущенном потоке.

Расчет по формуле (2.1) (фиг. 4, кривая 1), проведенный для условий выдува через плоскую пластину [5], показывает удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными.

По экспериментальным данным, при вдуве газа в сопло (фиг. 4, точки 3–5) наблюдается повышение давления Δp_{2c}° , причем это повышение отмечается лишь при превышении углом γ_x критических значений $\gamma_* \approx 70^\circ$ (фиг. 5). Расчет интенсивности повышения давления по формуле (2.1) для условий вдува через стенку дренированного сопла показал (фиг. 4, кривая 2) удовлетворительное соответствие с данными эксперимента только для тех сечений сопла, где $\gamma_x < \gamma_*$. При $\gamma_x > \gamma_*$ наблюдается возрастающее



Фиг. 5



Фиг. 6

различие между экспериментальными значениями Δp_{2c}° и соответствующими значениями Δp_{2p}° , вычисленными по формуле (2.1). Отношение интенсивностей повышения давления в сопле и на пластине $\Delta p_{2c}^\circ / \Delta p_{2p}^\circ$ может быть аппроксимировано для $\gamma_* < \gamma_x < 180^\circ$ зависимостью (фиг. 5)

$$\Delta p' = \Delta p_{2c}^\circ / \Delta p_{2p}^\circ = 1 + 0,15(\gamma_x - \gamma_*) \quad (2.2)$$

Как показали расчеты на основе соотношения (2.2), среднее давление на противоположной вдуву стороне сопла превышает среднее давление на пластине в 10 раз. Таким образом, существенное уменьшение коэффициента усиления при вдуве газа в сопло на режимах, приводящих к значительному распространению возмущения в основном потоке ($\gamma_a > 90^\circ$), обусловлено тремя факторами: ограничением боковыми стенками сопла поперечных размеров области возмущенного течения, увеличением доли области возмущенного течения с пониженным давлением вниз по потоку за вдуваемой струей и образованием на противоположной вдуву стороне сопла зоны с существенно повышенным давлением.

Полученные выводы позволяют определить принципиальный путь изменения организации вдуваемой струи с целью предотвратить уменьшение коэффициента усиления при увеличении расхода вдуваемого газа: расход через одиночное отверстие может увеличиваться до тех пор, пока для заданных параметров L_1° , α угол $\gamma_a < \gamma_*$; дальнейшее увеличение расхода должно уменьшать разрежение в области, расположенной вниз по потоку за отверстием вдува, и не приводить к расширению границ области возмущения.

На фиг. 6 показаны зависимости коэффициента усиления и угла полуохвата γ_a от суммарного расхода газа через основное отверстие вдува и систему отверстий поддува (приведены экспериментальные данные, относящиеся к варианту *a* сопла № 5; характеристики других вариантов системы отверстий поддува отличаются от приведенных не более чем на 5%). Сплошные кривые — $G_{22}^\circ = 0$, точки 1–4 соответствуют $G_{21}^\circ = 0,0025, 0,0125, 0,0260, 0,0435$.

Как видно, в области взаимодействия вдуваемого и основного потоков, характеризуемой углами $\gamma_a < 90^\circ$, зависимости $K = f(G_2^\circ)$ для случаев вдува газа через одиночное отверстие и через систему отверстий с поддувом

практически совпадают, что обусловлено малым различием размеров возмущенной зоны, определяемых углом γ_a ($G_2^\circ = G_{21}^\circ + G_{22}^\circ$). Однако в области взаимодействия, характеризуемой переходом возмущенной зоны на противоположную вдуву сторону сопла ($\gamma_a > 90^\circ$), поддув дает ощутимый положительный эффект. В этом случае перераспределение одного и того же расхода вдуваемого газа через систему отверстий с поддувом приводит к значительно меньшим углам γ_a и заметному ослаблению рассмотренных выше отрицательных эффектов, снижающих коэффициент усиления.

Положительный эффект от перераспределения расхода, характеризуемый коэффициентом $\Delta K_2^\circ = (K_2 - K_0)/K_0$ (здесь K_0 и K_2 — коэффициенты усиления при одном и том же расходе вдуваемого газа через одиночное отверстие и через систему отверстий с поддувом соответственно), зависит от соотношения расходов через отверстия поддува и основное отверстие G_{22}/G_{21} и от размера возмущенной зоны γ_{a0} , сформированной вдувом газа через основное отверстие. Приведенные экспериментальные данные аппроксимируются формулами с погрешностью не более 5–7%

$$\Delta K_2^\circ = C(\gamma_{a0}) \frac{G_{22}}{G_{21}}; \quad C(\gamma_{a0}) = 2,2 \cdot 10^{-2} (\gamma_{a0} - 100)$$

Таким образом, распределяя в определенном соотношении расход вдуваемого газа между основным отверстием и системой отверстий поддува, можно значительно расширить (по сравнению со вдувом через одно отверстие) рабочую область изменения расхода вдуваемого газа, в которой обеспечивается достаточно высокая эффективность создания боковых сил. Это обстоятельство особенно существенно, когда отверстие вдува расположено глубоко в сопле, а потребный уровень боковой силы достаточно высок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко Н. Д. Возмущения сверхзвукового потока при массотеплоподводе. Киев: Наук. думка, 1980. 221 с.
2. Зеленцов В. В., Нестеров А. А., Породенко В. В., Шишков А. А. Экспериментальное исследование сопел Лавалья с несимметричным вдувом газа. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 2, с. 188—193.
3. Мельников Д. А., Пирумов У. Г., Сергиенко А. А. Сопла реактивных двигателей. — В кн.: Аэромеханика и газовая динамика. М.: Наука, 1976, с. 57—75.
4. Глаголев А. И., Зубков А. И., Панов Ю. А. Обтекание струйного газообразного препятствия на пластине сверхзвуковым потоком. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1967, № 3, с. 97—102.
5. Зубков А. И., Глаголев А. И. Исследование характерных параметров трехмерного отрывного течения, возникающего при вдуве струй различных газов в сверхзвуковом потоке. Отчет Ин-та мех. МГУ. 1970, № 1191. 66 с.

Москва

Поступила в редакцию
20.XII.1983