УДК 533.697.4 + 533.6.011.35 + 533.6.071.3 DOI: 10.15372/PMTF202315336

## ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ПИЛОНОВ НА ПАРАМЕТРЫ СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ В СОПЛЕ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

## Н. П. Киселев, И. Н. Кавун, В. И. Запрягаев, Р. А. Стяжкин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mails: nkiselev@itam.nsc.ru, i\_k@itam.nsc.ru, zapr@itam.nsc.ru, goblin160@yandex.ru

Проведено исследование высокоскоростного течения в осесимметричном сопле с расположенными в нем центральным телом и пилонами. Определено влияние геометрии основных и дополнительных пилонов на газодинамические и тяговые характеристики на выходе из сопла в режиме течения  $n_{pr} = 2,25$  ( $n_{pr}$  — отношение давления в форкамере к давлению в окружающем пространстве). Выявлена азимутальная неоднородность потока на выходе из сопла. Максимальная величина азимутальной неоднородности регистрируется в следе за пилонами. Показано, что в тракте сопла с пилонами, установленными в минимальном проходном сечении, реализуется трехмерное трансзвуковое течение, в котором образуются локальные сверхзвуковые области, замыкаемые слабыми скачками уплотнения. Установлено, что наличие такой ударно-волновой структуры приводит к уменьшению тяги сопла на 12 %.

Ключевые слова: сопло, центральное тело, поддерживающие пилоны, трансзвуковое течение, скачок уплотнения, течение в следе за телом, реактивная тяга

Введение. Известно, что сопло авиационного двигателя может содержать различные внутренние конструкции, такие как центральное тело и поддерживающие его пилоны. В некоторых случаях наличие этих конструктивных элементов может оказывать влияние как на структуру и газодинамические параметры течения, так и на его тяговые характеристики. Например, в случае малых размеров авиадвигателя пилоны и поддерживающие устройства могут устанавливаться вблизи выходного сечения, где поток достигает трансзвуковой или сверхзвуковой скорости. В этом случае влияние пилонов может оказаться существенным.

Кроме того, в высокоскоростной струе, истекающей из сопла, наличие поддерживающих пилонов приводит к формированию трехмерной структуры течения [1]. В работе [1] показано, что уровень возмущений, формируемых пилонами, зависит от характера их обтекания — дозвукового или трансзвукового. Возмущения, создаваемые пилонами, установленными в тракте с малой степенью поджатия, на порядок превышают возмущения, генерируемые пилонами в тракте с большой степенью поджатия. Однако влияние внутренней конструкции сопла на пространственное распределение газодинамических параметров потока в ряде случаев не учитывается [2–4].

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теоретической и прикладной механики СО РАН с использованием оборудования центра коллективного пользования "Механика".

<sup>©</sup> Киселев Н. П., Кавун И. Н., Запрягаев В. И., Стяжкин Р. А., 2023

В настоящее время существенное внимание уделяется поиску способов уменьшения акустического излучения струи путем изменения геометрической формы выходного сечения сопла с помощью вихреобразующих устройств — табов и шевронов, а также вдува малоразмерных струй в основной поток [5, 6], что приводит к изменению тяговых характеристик. В двухконтурных соплах отклоняемые лопатки, установленные внутри вентиляторного контура сопла в минимальном проходном сечении вблизи его среза, используются для снижения шума. В [7] изучалось влияние геометрии отклоняемых дефлекторов на трехмерную картину течения и уровень акустического шума, в [8, 9] — влияние геометрии центрального тела и поддерживающих пилонов на газодинамические и акустические характеристики струи, истекающей из сопла вертолетного двигателя.

Проведенный обзор литературы показывает актуальность изучения структуры течения в каналах со слабой степенью поджатия либо расширения потока при наличии пространственных возмущений, создаваемых находящимися в этой области конструктивными элементами. Целью данной работы является определение влияния внутренних пилонов, установленных в канале конвергентного сопла с центральным телом, на локальные и интегральные газодинамические характеристики высокоскоростного внутрисоплового течения, а также исследование пространственной структуры течения в режиме истечения  $M_a = 1,0, n_{pr} = 2,25$  ( $M_a$  — геометрическое число Маха;  $n_{pr}$  — отношение давления в форкамере к давлению в окружающем пространстве). Данный газодинамический режим соответствует режиму, в котором была выявлена трехмерная структура течения в двухконтурном сопле [1].

1. Методика исследования. Проведено численное и экспериментальное исследование газодинамических параметров и структуры течения внутри тракта сопла. Исследуемая модель представляла собой осесимметричное конвергентное профилированное сопло с центральным телом (ЦТ) и выходной частью в виде оживала.

Конвергентное сопло имеет профилированную внутреннюю поверхность, форма которой рассчитывалась по формуле Витошинского [10]. Контуры сопла и ЦТ показаны на рис. 1, *a*, газодинамический тракт сопла образован этими поверхностями. Диаметр сопла на выходе  $D_a = 60$  мм, степень поджатия контура равна 2,15. Внутри сопла установлено ЦТ 2, что позволило получить в тракте сопла протяженную область  $(-1,9 < x/D_a < -0,3)$  с числом Маха M = 0,9. Вблизи выходного среза (в области  $-0,3 < x/D_a < 0$ ) контур меняется таким образом, чтобы на срезе достигалось значение  $M_a = 1$  (линия I на рис. 1,6).

Геометрия сопла представлена на рис. 2. Моделировались три варианта:

1) сопло с ЦТ без пилонов;

2) сопло с ЦТ при наличии поддерживающих пилонов (ПП) на входе;

3) сопло с ЦТ, ПП на входе и дополнительными пилонами (ДП), установленными в минимальном проходном сечении.

Внутри сопла 1 установлено ЦТ 2 с тремя основными ПП 3 толщиной 10 мм, расположенными на входе в сопло с шагом  $120^{\circ}$ . Отношение площади проходного сечения входной части сопла с ЦТ без пилонов к площади этого сечения сопла с ЦТ и ПП составляет 1,17.

Вблизи минимального проходного сечения, соответствующего числу Маха M = 0.9, расположены три ДП толщиной 6 мм, высотой 9 мм и длиной 30 мм. ДП расположены таким образом, чтобы не затенялись основные ПП. Загромождение канала основными ПП на входе (линия II на рис. 1,6) приводит к незначительному увеличению числа Маха до значения M = 0.33. Наличие ДП приводит к формированию критического сечения при  $x/D_a = -1.7$ , за которым на отрезке  $-1.5 \leq x/D_a \leq -0.3$  число Маха равно M = 1.1 (кривая II на рис. 1,6). Соотношение площади проходного сечения канала сопла без пилонов к площади этого сечения сопла с ДП в зоне размещения ДП составляет 1,084, т. е. почти в два раза меньше, чем в случае ПП.



Рис. 1. Геометрия внутреннего тракта сопла:

a— профили сопла и ЦТ (1— профиль сопла, 2— ЦТ, 3— поддерживающие пилоны, 4— дополнительные пилоны),  $\delta$ — геометрическое число Маха (I— контур сопла без дополнительных пилонов, II— то же при их наличии)



Рис. 2. Геометрия сопла: *а* — вид сбоку, *б* — вид спереди; *1* — сопло, *2* — ЦТ, *3* — ПП, *4* — ДП

Численный расчет течения в сопле с ЦТ выполнен с использованием программы ANSYS Fluent.

Рабочее тело струи (воздух) — совершенный газ — описывается уравнением состояния Менделеева — Клапейрона. Коэффициенты динамической вязкости  $\mu$  и теплопроводности  $\lambda$  являются функциями температуры и рассчитываются по формулам Сазерленда и Эйкена.

Уравнения сохранения импульса и энергии включают тензор турбулентных (рейнольдсовых) напряжений. Входящий в тензор напряжений коэффициент турбулентной вязкости  $\mu_t$  вычисляется с использованием двухпараметрической дифференциальной SST- $(k-\omega)$ -модели турбулентности течения. Стенки сопла, ЦТ и пилонов являются адиабатическими (теплообмен между поверхностью сопла и газом отсутствует).

Расчет выполнен в трехмерной стационарной постановке. Уравнения решались с использованием противопоточной схемы со вторым порядком точности аппроксимации входящих в уравнения производных. Количество шестигранных ячеек, образующих расчетную сетку, равно 2 · 10<sup>6</sup>. Кроме того, для варианта расчета течения в сопле с ЦТ, ПП и ДП дополнительно проведен расчет на сетке, содержащей 11,8 · 10<sup>6</sup> ячеек.

Использовались следующие газодинамические параметры: рабочее тело струи — холодный воздух, температура воздуха  $T_0 = T_e = 300$  K, давление на входе в сопло  $p_0 = 0.225$  МПа, давление в окружающем пространстве за выходным срезом  $p_e = 0.1$  МПа. Расчет параметров турбулентности k и  $\omega$  на всех свободных границах расчетной области проводился при следующих условиях: интенсивность турбулентности I = 0.5 %, отношение турбулентной вязкости к молекулярной  $\mu_t/\mu = 1$ .

Достоверность результатов численного расчета проверена путем сравнения с экспериментальными данными. Эксперимент выполнен на вертикальной струйной установке Института теоретической и прикладной механики СО РАН. Фотографии экспериментального оборудования представлены на рис. 3.

Внутри сопла установлено ЦТ с тремя основными ПП толщиной 10 мм. ЦТ с ДП, расположенными в минимальном сечении, показано на рис. 3,*д*,*е*.



Рис. 3. Экспериментальное оборудование:

a — сопло с ЦТ и трубка Пито,  $\delta$  — сопло с ЦТ (вид со стороны выходного среза), e — сопло с ЦТ и ПП (вид со стороны входа в сопло), z — ЦТ, d — ЦТ с ПП и ДП (вид со стороны входа в сопло), z — ЦТ, d — ЦТ с ПП и ДП (вид соску), e — ЦТ с ПП и ДП (вид сзади); 1 — сопло, 2 — ЦТ, 3 — ПП, 4 — ДП

Проведено зондирование течения вниз по потоку от среза сопла трубкой Пито, внешний диаметр которой равен 0,6 мм, внутренний — 0,4 мм. Для измерения давления использовался тензометрический датчик давления ТДМ-А-0,6 с рабочим диапазоном  $0 \div 0,6$  МПа (погрешность измерения составляет 0,0006 МПа (0,1 %)). Перемещение зонда вблизи выходного среза сопла обеспечивалось трехосевым координатным устройством (погрешность позиционирования по каждой из координатных осей равна 20 мкм).

Газодинамические параметры течения определялись соотношением  $n_{pr} = p_0/p_e = 2,25$ , эксперименты проведены при температуре  $T_0 = 273 \div 300$  K,  $T_e = 288 \div 293$  K ( $p_0$  — давление в форкамере установки,  $p_e = 0,098$  МПа — давление в окружающем пространстве,  $T_0$ ,  $T_e$  — температура в форкамере и окружающем струю пространстве (в помещении установки)). Погрешность измерения температуры составляла приблизительно 1 К. Измерения давления в помещении  $p_e$  осуществлялись датчиком абсолютного давления ТДМ-А-0,16 с погрешностью измерения 0,1 %. В форкамере установки измерения давления проводились датчиком давления ПД100-ДИ с верхним пределом измерений 2,5 МПа и погрешностью измерения 0,5 % этого значения. В ходе эксперимента необходимый режим достигался путем поддержания постоянного значения  $n_{pr}$ . Среднеквадратичное отклонение давления в форкамере установки от среднего значения при проведении эксперимента составляло 0,4 %.

Получены распределения полного измеренного давления (давления Пито) по азимуту ( $\varphi = 0 \div 360^{\circ}$ ) в выходном сечении сопла с ЦТ и ПП, а также в выходном сечении сопла с ЦТ, ПП и ДП на расстоянии  $x/D_a = 0,017$  от среза сопла при постоянном радиусе  $r/D_a = 0,37$ .

**2.** Результаты исследования. На рис. 4 представлены результаты численного моделирования для газодинамического режима течения в сопле  $n_{pr} = 2,25$ . Рассматривались три варианта геометрии сопла: сопло с ЦТ (без пилонов), сопло с ЦТ и ПП, сопло с ЦТ, ПП и ДП.

Режим течения в сопле с ЦТ без пилонов используется для выявления влияния ПП на внутрисопловое течение. Данный режим течения характеризуется истечением из сопла слабонедорасширенной струи со степенью нерасчетности  $n_p = p_a/p_e = 1,18$  ( $p_a$  — статическое давление на срезе сопла). Результаты расчета представлены в продольной вертикальной плоскости z = 0.

В сопле без пилонов, в сужающейся части (см. рис. 4,*a*) реализуется равномерное распределение числа Маха, соответствующее числу Маха, рассчитанному по формуле для изоэнтропического течения (линия I на рис. 1,*б*). На входе в сопло число Маха составляет 0,16. Далее вниз по потоку за счет увеличения поперечного сечения ЦТ происходит уменьшение проходного сечения и увеличение скорости потока ( $M \approx 0.9$ ) в минимальном проходном сечении ( $x/D_a = -2.0$ ), которая остается практически постоянной во всем канале до сечения  $x/D_a = -0.3$ . Затем скорость увеличивается и вблизи выходного сечения достигает величины, соответствующей числу Маха  $M \approx 1$ . На выходе из сопла вследствие нерасчетности режима истечения формируется ударно-волновая бочкообразная структура течения. На оживальной части ЦТ реализуется течение с отрывом потока, обусловленное геометрией конуса ЦТ сопла. Внутри отрывной области возникает дозвуковой режим течения  $M = 0.1 \div 0.4$ .

Течение в сопле с ПП показано на рис. 4,  $\delta$ . Отличие этого течения от течения в сопле с ЦТ без пилонов заключается в незначительном торможении потока в области ПП, при этом в следе за пилоном  $(y/D_a > 0)$  число Маха равно 0,22, в сечении между пилонами  $(y/D_a < 0) - 0,31$ . Данная тенденция сохраняется на всей длине сопла (различие не превышает 3 %). На рис. 4,  $\delta$  видно, что установленный в дозвуковой части тракта сопла ПП не оказывает существенного влияния на пространственную картину течения. Структура течения незначительно отличается от структуры течения в сопле с ЦТ без пилонов.



Рис. 4. Распределение числа Маха в плоскости z = 0: a — сопло с ЦТ без пилонов,  $\delta$  — сопло с ЦТ и ПП,  $\epsilon$  — сопло с ЦТ, ПП и ДП; 1 — контур сопла, 2 — ЦТ, 3 — ПП, 4 — ДП



Рис. 5. Распределения чисел Маха в поперечных сечениях для сопел с ПП (слева) и с ПП и ДП (справа):  $a - x/D_a = -1.5, \ \delta - x/D_a = 0.017; \ 1 - \Pi\Pi, \ 2 - Д\Pi$ 

Для сопла с ПП и ДП газодинамическая структура течения в канале изменяется существенно (см. рис. 4,  $\epsilon$ ). В сопле формируется пространственное сверхзвуковое течение. Уменьшение площади проходного сечения вследствие наличия ДП приводит к образованию в их окрестности критической области с числом Маха М  $\approx$  1. Реализуется сложная пространственная картина течения: вниз по потоку последовательно формируются области разрежения, замыкаемые скачками уплотнения. Максимальное локальное число Маха равно M = 1,34 ( $x/D_a = -1,4$ ).

Непосредственно за ДП наблюдается течение в виде следа, распространяющегося вниз по потоку, а в зоне стыка пилонов с контурами сопла и ЦТ (см. рис. 4, e,  $y/D_a < 0$ ) на поверхности последних формируются отрывные области. На рис. 4, e видно, что M < 1 во всем следе за ДП, за исключением области  $x/D_a \approx -1$  (M = 1,07), которая замыкается локальным скачком уплотнения. Неравномерность распределения числа Маха сохраняется в выходном сечении и в свободной струе вниз по потоку.

Распределения числа Маха в поперечных сечениях внутри канала  $(x/D_a = -1,5)$  и вблизи среза сопла  $(x/D_a = 0,017)$  представлены на рис. 5.

Внутри сопла (см. рис. 5,*a*, *слева*) распределение числа Маха практически однородно ( $M = 0.88 \div 0.89$ ) с незначительным отклонением в следе за ПП, где число Маха уменьшается до значения M = 0.86. В сопле с ДП (см. рис. 5,*a*, *справа*) распределение числа Маха имеет существенно неравномерный характер, при этом число Маха изменяется от значения  $M \approx 0.44$  в следе за ДП до значения M = 1.5 в областях непосредственно перед скачками уплотнения. Четко выраженный след за ПП отсутствует.

На выходе из сопла с ПП (см. рис. 5, б, слева) наблюдается практически равномерное распределение числа Маха M = 1,03, при этом число Маха незначительно уменьшается за ПП (M = 1,02). При наличии ПП и ДП (см. рис. 5, б, справа) число Маха варьируется в диапазоне от значения  $M = 0.8 \div 0.9$  в следе за ДП до значения M = 1,13, соответствующего сверхзвуковой скорости, в областях между ними. При этом влияние ПП не зафиксировано.

Пространственная структура течения в канале сопла показана на рис. 6. На рис. 6, *а* показано распределение числа Маха на срединной поверхности, равноудаленной от профиля сопла и ЦТ. Видно, что в этом случае реализуется сложная ударно-волновая ячеистая структура течения.



Рис. 6. Пространственная структура течения в сопле с ЦТ, ПП и ДП: *a* — распределение числа Маха на срединной поверхности канала сопла, *б* — газодинамическая схема течения; *1* — сопло, *2* — ЦТ, *3* — ПП, *4* — ДП, *5* — срединная поверхность; сплошные линии — скачки уплотнения, штриховые — волны разрежения, пунктирные — след за пилонами

На рис.  $6, \delta$  приведена газодинамическая схема течения. За ДП формируется дозвуковой след I, распространяющийся вниз по потоку. При обтекании кормовой сужающейся части пилонов трансзвуковым потоком формируются вееры волн разрежения II, в которых воздух разгоняется до сверхзвуковой скорости, и замыкающие эти области скачки III. Системы из вееров II и скачков III за различными пилонами пересекаются и достигают следа I за противоположными пилонами, образуя первый слой ударно-волновых ячеек A. Далее эти волны разрежения и скачки отражаются от следа за пилонами в виде волн IV и V соответственно и образуют последовательные слои ячеек B и C. Аналогичным образом возникают волны VI и VII, образуя слой D. Эти области замыкаются скачком VIII, формирующимся в результате поджатия контура в выходной части сопла, за которым образуется область повышенного статического давления E.

Кроме того, устанавливающаяся в тракте сопла система скачков III, V, VII, VIII взаимодействует с пограничным слоем на стенках сопла и ЦТ. При этом образуются тонкие отрывные области, которые при данной геометрии сопла с постоянной площадью поперечного сечения вниз по потоку за пилонами могут вызывать увеличение или уменьшение реального проходного сечения канала и влиять на локальное распределение числа Маха в тракте. В частности, толщина кольцевой отрывной области на поверхности сопла за скачком VIII постепенно уменьшается вниз по потоку, что приводит к увеличению в выходной области проходного сечения и росту числа Маха до значения, соответствующего сверхзвуковому течению.

Достоверность результатов численного расчета проверялась путем сравнения их с результатами измерения полного давления в истекающей из сопла струе с помощью трубки Пито. Азимутальные профили измеренного полного давления  $p_{\rm Pt}$ , нормированного на давление в форкамере установки  $p_0$ , представлены на рис. 7 (линии 1, 2). Измерения проведены вблизи выходного сечения сопла  $x/D_a = 0,017$  при постоянном радиусе  $r/D_a = 0,37$ .

На азимутальных профилях регистрируется неравномерность распределения измеренного полного давления. Для сопла с ЦТ и ПП имеют место минимумы давления при  $\varphi = 0$ , 120, 240° (кривая 1). Положение минимумов соответствует углам установки ПП, а их на-



Рис. 7. Азимутальные профили измеренного полного давления: 1, 1' — сопло с ПП, 2, 2' — сопло с ПП и ДП; 1, 2 — эксперимент, 1', 2' — расчет

личие обусловлено наличием следа за пилонами. Отклонение величины данных минимумов от среднего значения давления между ПП составляет 1–2 %.

Наличие ДП (кривая 2), установленных в трансзвуковой области течения, приводит к существенному изменению профиля. Помимо основных минимумов при  $\varphi = 0$ , 120, 240°, обусловленных наличием ПП, регистрируются минимумы при  $\varphi = 64$ , 184, 304°, положение которых соответствует положению ДП (см. рис. 3, e). Величина минимумов полного давления в следе за ПП значительно меньше, чем в следе за ДП. Наблюдаемые на рис. 7 минимумы в следе за ДП различаются незначительно, что может быть вызвано неполной идентичностью их геометрической формы. Максимальное различие измеренных величин минимумов за ДП и максимального давления в области углов между пилонами составляет 11 %.

Таким образом, экспериментально определено влияние наличия ПП и ДП на величину неоднородности азимутального давления, которая составляет 1 % для сопла с ПП и 11 % для сопла с ПП и ДП.

На рис. 7 приведены также соответствующие расчетные данные (кривые 1', 2'). Видно, что результаты расчета и эксперимента удовлетворительно согласуются. Различие результатов расчета и эксперимента для сопла с ПП составляет 1 %, что обусловлено погрешностью измерения давления в форкамере (кривые 1, 1') установки. Для сопла с ПП и ДП различие расчетного и экспериментального значений давления в следе за ПП  $(\varphi = 0, 120, 240^{\circ})$  практически отсутствует (кривые 2, 2' на рис. 7), а в следе за ДП  $(\varphi = 64, 184, 304^{\circ})$  составляет порядка 10 % в его центральной части. Этот результат можно объяснить, используя рис. 6. След за ПП и ДП взаимодействует со скачками уплотнения, формируемыми пилонами. Поскольку след можно приближенно представить в виде квазидвумерного (вдоль азимутальной координаты) сдвигового течения, возмущения, вызванные скачками уплотнения, приводят к появлению азимутальных колебаний следа и, как следствие, к увеличению пульсаций потока во всем тракте сопла. Время измерения давления трубкой Пито в эксперименте в каждой точке профиля составляет 2 с. Трубка соединена с датчиком давления с помощью пневмотрассы длиной 2 м, поэтому регистрируется не мгновенное локальное, а осредненное в пространстве (за счет колебаний следа в азимутальном направлении) и времени значение давления. Поскольку в сопле только

№ п/п	Тип сопла	$\langle p_{ m Pt}/p_0  angle,~\%$	
		Эксперимент	Расчет
1	Сопло с ЦТ без пилонов		$2 \cdot 10^{-3}$
2	Сопло с ЦТ и ПП	$0,\!54$	0,5
3	Сопло с ЦТ, ПП и ДП	$3,\!30$	$5,\!6$

Азимутальная неоднородность полного давления на выходе из сопла

с ПП скачки не образуются, а сам след существенно слабее, чем след за ДП, уровень пульсаций (а следовательно, и различие результатов расчета и эксперимента) в сопле с ПП должен быть существенно меньше, чем в сопле с ПП и ДП. Косвенным подтверждением этого предположения является различие кривых 1 и 2 на рис. 7 (кривая 1 является более гладкой).

Для оценки влияния пилонов на однородность потока, истекающего из сопла, используется величина стандартного отклонения полного давления для азимутального профиля:

$$\langle p \rangle = \sqrt{\frac{(p_i - p_m)^2}{n - 1}} \cdot 100.$$

Здесь  $p_i$  — измеренное значение давления, соответствующее азимутальному углу  $\varphi_i$ ;  $p_m$  — среднее значение давления; n — количество измерений. Вычисленные по этой формуле значения величины стандартного отклонения для азимутальных профилей полного давления  $\langle p \rangle = \langle p_{\rm Pt}/p_0 \rangle$  (см. рис. 7) приведены в таблице. Из таблицы следует, что в случае сопла с ПП величины азимутальной неоднородности профиля в расчете и эксперименте близки, а при наличии ПП и ДП величина отклонения, полученная в расчете, существенно больше, что может быть обусловлено наличием существенных пульсаций потока в последнем случае. Величина неоднородности течения, вызванной влиянием ДП, на порядок превышает величину неоднородности за ПП (в 6 раз в эксперименте и в 11 раз в численном расчете).

Аналогичное влияние ПП обнаружено в экспериментах [1], в которых пилоны, установленные на внешнем контуре на входе в сопло (M = 0.9), генерировали возмущения, приблизительно в 10 раз превышающие возмущения дозвукового течения, реализующегося во внутреннем контуре, где M = 0.3.

С использованием результатов численного расчета были вычислены потери тяги сопла. Тяга рассчитывалась по формуле [11]

$$F_T = \int\limits_s (p_a - p_e + \rho v^2) \, ds,$$

где  $\rho$ , v, s — плотность, скорость газа и площадь выходного сечения сопла. Потери тяги вычислялись как разность значений тяги для случаев 2, 1 и 3, 1 в таблице.

Для конфигурации сопла с ЦТ и ПП потери тяги составили 0,3 % значения тяги сопла с ЦТ без пилонов, что соизмеримо с погрешностью численного расчета. Для конфигурации с ПП и ДП потери тяги составили 12,5 %.

Заключение. Проведено исследование структуры и газодинамических характеристик течения в сопле с ЦТ для трех вариантов: сопло с ЦТ, сопло с ЦТ и ПП на входе в сопло и сопло с ЦТ, ПП и ДП, установленными в минимальном проходном сечении.

Выявлена азимутальная неоднородность распределения газодинамических параметров в канале сопла с пилонами. Показано, что наиболее существенное влияние на величину азимутальной неоднородности распределения измеренного полного давления оказывают пилоны, расположенные вблизи минимального проходного сечения внутрисоплового канала. Показано, что наличие таких пилонов приводит к загромождению проходного сечения сопла, за которым реализуется система волн разрежения и скачков уплотнения, образующих ячеистую ударно-волновую структуру.

Наиболее значительное влияние возмущений за пилонами регистрируется для сопла с ПП и ДП. В этом случае величина азимутальных возмущений полного давления составляет 5,6 % (численный расчет) и 3,3 % (эксперимент) соответствующей величины для сопла без пилонов. При этом величина азимутальной неоднородности для основных ПП, расположенных на входе, не превышает 0,5 %.

Результаты расчета показывают, что наличие ячеистой ударно-волновой структуры в тракте сопла с ЦТ, ПП и ДП приводит к потере тяги на 12,5 % по сравнению с соплом без ДП.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. Запрягаев В. И., Киселев Н. П., Пивоваров А. А. Особенности формирования трехмерной структуры течения в высокоскоростной струе, истекающей из модельного двухконтурного сопла // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 1. С. 25–35. DOI: 10.1134/S0869864320010023.
- 2. Босняков С. М., Волков А. В., Дубень А. П. и др. Сравнение двух вихреразрешающих методик повышенной точности на неструктурированных сетках применительно к моделированию струйного течения из двухконтурного сопла // Мат. моделирование. 2019. Т. 31, № 10. С. 130–144. DOI: 10.1134/S0234087919100101.
- Peery K. M., Forester C. K. Numerical simulation of multistream nozzle flows // AIAA J. 1980. V. 18, N 9. P. 1088–1093. DOI: 10.2514/3.50858.
- Xiong J., Nielsen P., Liu F., Papamoschou D. Computation of high-speed coaxial jets with fan flow deflection // AIAA J. 2010. V. 48, N 10. P. 2249–2262. DOI: 10.2514/1.J050331.
- Sayed N. H., Mikkelsen K. L., Bridges J. E. Acoustics and thrust of separate-flow highbypass-ratio engines // AIAA J. 2003. V. 41, N 3. P. 372–378. DOI: 10.2514/2.1986.
- Alkislar M. B., Krothapalli A., Butler W. G. The effect of streamwise vortices on the aeroacoustics of a Mach 0.9 jet // J. Fluid Mech. 2007. V. 578. P. 139–169. DOI: 10.1017/S0022112007005022.
- Papamoschou D. Fan flow deflection in simulated turbofan exhaust // AIAA J. 2006. V. 44, N 12. P. 3088–3097. DOI: 10.2514/1.22552.
- Cetin M. O., Pauz V., Meinke M., Schröder W. Computational analysis of nozzle geometry variations for subsonic turbulent jets // J. Comput. Fluids. 2016. V. 136. P. 467–484. DOI: 10.1016/j.compfluid.2016.05.033.
- Cetin M. O., Koh S. R., Meinke M., Schröder W. Numerical analysis of the impact of the interior nozzle geometry on low Mach number jet acoustics // Flow Turbulence Combust. 2017. V. 98. P. 417–443. DOI: 10.1007/s10494-016-9764-z.
- 10. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974.
- 11. Седов Л. И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1973. Т. 2.

Поступила в редакцию 14/VI 2023 г., после доработки — 14/VI 2023 г. Принята к публикации 4/VIII 2023 г.