

двигателя и усложнением конструкции, и, если бы речь шла только о снижении удельного расхода топлива на такую величину, регулирование сопла первого контура вряд ли было целесообразным.

Но регулируемое сопло первого контура может быть использовано для уменьшения уровня шума при заходе на посадку. У двигателей с высокой степенью двухконтурности вентилятор является мощным источником шума. Уменьшением сечения сопла первого контура при сохранении потребной тяги можно снизить число оборотов ротора вентилятора и тем самым — уровень шума.

В иностранной печати [3, 4] имелись сведения о применении регулируемых сопел на двухконтурных двигателях нового поколения. На двигателях фирмы Роллс-Ройс RB-207 и RB-211 применяются регулируемые сопла внутреннего контура для уменьшения уровня шума. Ранее сообщалось, что при проектировании двигателя RB.178—51 предусматривалось регулирование сопла (не указывалось, какого контура) с целью улучшения характеристик на крейсерском режиме.

Из сказанного следует, что регулирование сопел двухконтурных двигателей является эффективным средством улучшения экономичности в крейсерских условиях полета, снижения шума и увеличения запасов устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клячкин А. Л. Двухконтурные турбореактивные, турбовентиляторные и турбовинтовые двигатели. РИИГА. Рига, 1964.
2. Первышин Н. В., Кучинская Т. П. К вопросу о выборе расчетной точки на характеристике вентилятора ДТРД с высокой степенью двухконтурности. ИВУЗ, «Авиационная техника», № 3, 1970.
3. The Rolls-Royce RB. 207 powerplant for the European airbus. Interavia AAE. 1967. XII. N 12., p. 1874—1875.
4. American Aviation 30 сентября 1968 г., т. 32, № 9, стр. 32.

УДК 621.45:533.697.4

И. Н. Денисов, Б. Д. Фишбеин, Ю. И. Цыбизов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОГО ПОЛЯ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СУЖАЮЩЕГОСЯ СОПЛА

В различных газотурбинных установках и струйных устройствах поток обычно имеет неравномерное распределение параметров по сечению. В инженерной практике расчеты таких устройств проводятся по средним значениям параметров в рамках одномерной теории. Возникает необходимость в уточнении формул расчета действительных течений. С этим же вопросом связана и за-

дача об использовании результатов экспериментов на моделях при равномерном поле параметров потока в расчете устройств с различной интенсивностью неравномерности.

Количество экспериментальных работ в этой области невелико. К ним можно отнести исследования, выполненные в 1955—1957 гг. В. Д. Соколовым для сужающихся сопел с углом образующей $\gamma_c = 0 \div 15^\circ$ и А. А. Сергиенко для профилированных сопел. Однако указанные эксперименты не охватывают области больших углов γ_c и поджатий $n = \left(\frac{D_{вх}}{D_{вых}}\right)^2$, характерных для современных ДТРДФ.

В настоящей работе предпринята попытка исследования влияния неравномерности поля полного давления на входе в сопло на расходные и тяговые характеристики его при $\gamma_c = 0 \div 60^\circ$ и $n \approx 2,0$.

АППАРАТУРА И ЭКСПЕРИМЕНТ

Объект исследования. Были исследованы три осесимметричных сужающихся сопла, размеры и форма которых показаны на рис. 1. Сопла № 1 и 3 являются коническими, а сопло № 2 спрофилировано по формуле Витошинского [1]. Все три сопла препарированы для замера распределения статического давления на внутренней поверхности сужающейся части.

Стенд для испытания. Схема и основные узлы стенда показаны на рис. 2. В качестве воздуходувки 1 использовался ГТД со специальным камером сгорания 2 для отбора воздуха. От воздуходувки по магистрали 3 диаметром 305 мм воздух подается к шиберу, предназначенному для регулирования расхода и давления воздуха. Подвод воздуха к подвижной системе осуществляется через узел уплотнения, состоящий из неподвижного внутреннего корпуса, подвижного наружного корпуса, подвешенного на лентах 6, и узла уплотнения между ними. К узлу уплотнения воздух подводится через сильфоны с двух противоположных сторон по нормали к оси подвижной части стенда.

После поворота в узле уплотнения поток выравнивается струе-выпрямителем 7 и направляется в мерный участок 8, где измеряются температура $T_{вх}^*$, давление $P_{вх}^*$ и расход воздуха G на входе в экспериментальную установку 9. Подвижная часть стенда подвешена на вертикально расположенных гибких лентах и имеет возможность перемещаться под действием приложенной силы. Регистрация этих перемещений производится с помощью тягоизмерительной системы 5.

Экспериментальная установка. Схема установки в двух вариантах сборки показана на рис. 3. Установка состоит из двух цилиндрических участков 1, между которыми устанавливались две различные решетки 3. Решетка № 1 имитировала выпуклое поле $P_{вх}^*$; решетка № 2 — вогнутое поле $P_{вх}^*$ (рис. 4). На расстоянии 2-х калибров от решетки-имитатора крепилось испытуемое сопло 5.

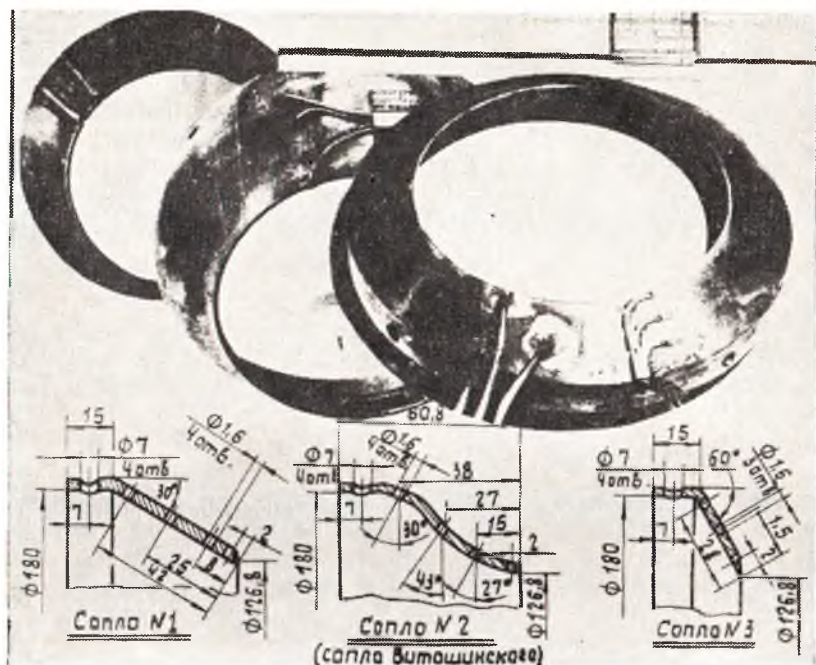


Рис. 1. Модели сопла

На входе в установку полное давление измерялось 7-точечной пневмогребенкой 2, статическое давление — в трех точках на стенке канала.

Температура потока измерялась гребенкой с тремя хромель-копелевыми термопарами и фиксировалась электрическим потенциометром ЭПП-0,9.

В варианте сборки I вниз по потоку от решетки производилось измерение полей полного и статического давлений с помощью перемещаемой шайбы, положение которой фиксируется координатником 4. Измерение поля статического давления на срезе сопла осуществлялось с помощью специально препарированной пластины 6, описание которой приведено в [2].

В варианте сборки II полное давление за решетками измерялось 7-точечной пневмогребенкой 7, а полное давление на срезе сопла 5-точечной гребенкой 8.

Погрешность измерения параметров. В процессе эксперимента измерялись расход воздуха G , давление, температура.

Давление измерялось неподвижными и перемещаемыми датчиками. Регистрация замера производилась с помощью ГРМ; погрешность измерения не превышала $\pm 0,5\%$ [3]. Измерение температуры потока осуществлялось термогребенкой с тремя хромель-копелевыми термопарами и фиксировалось ЭПП-0,8 с погрешностью $\sim 1\%$ [3].

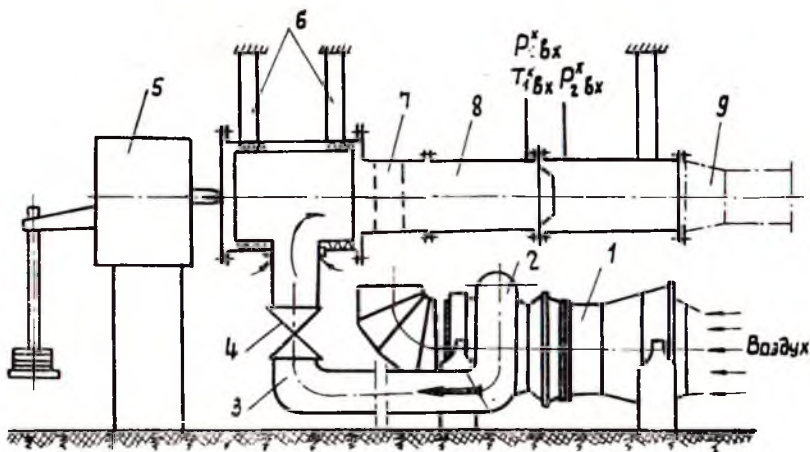


Рис. 2. Схема стенда для испытания моделей сопла

1 — воздуходувка (ГТД); 2 — ресивер отбора воздуха; 3 — воздухопровод; 4 — шибер; 5 — тягоизмеритель; 6 — ленты подвески; 7 — струеуспокоитель; 8 — мерный участок; 9 — экспериментальная установка

Расход воздуха замерялся соплом Вентури $\varnothing 150$ мм и подсчитывался по «Правилам 28—64». Средняя квадратичная относительная погрешность замера определяется погрешностями коэффициентов расхода α и ϵ , погрешностями измерения p и T и, вычисленная по «Правилам 28—64», составляет 1,1%.

Порядок проведения эксперимента. В начале эксперимента проводились «базовые» испытания сопел с равномерными полями параметров на входе в сопло. Затем последовательно устанавливались решетки-имитаторы исходных неравномерностей полей полного давления.

Режим работы определялся величиной располагаемого перепада давления.

Обработка результатов эксперимента. Для базовых испытаний располагаемый перепад определялся как отношение $\frac{P_{вх}^*}{P_n}$, где $P_{вх}^*$ — среднее арифметическое из показаний семиточечной гребенки полных давлений, расположенной на входе в сопло.

При испытаниях с неравномерным полем полных давлений величина располагаемого перепада π_c^* определялась путем осреднения замеренных параметров потока с сохранением расхода, полной энтальпии и импульса в сечении на входе в исследуемое сопло [4] и в предположении равномерного поля полной температуры по формуле

$$\pi_c^* = \frac{\sum f(\lambda_i) P_i^* \Delta F_i}{f(\lambda_{вх}) F \cdot P_n} \quad (1)$$

В (1) $f(\lambda_i) = \left(1 + \lambda_i^2\right) \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda_i^2\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$ — газодинамическая функ-

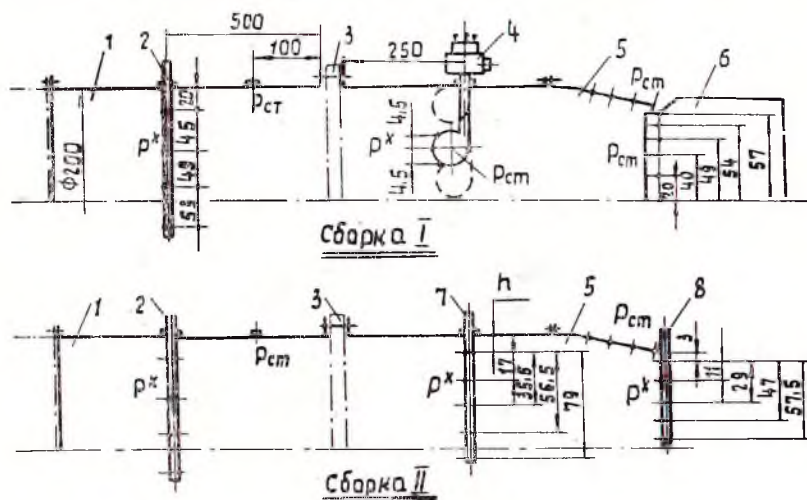


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

1 — мерный участок; 2 — гребенка замера P^* ; 3 — решетка-имитатор поля P^* ; 4 — координатник; 5 — модель сопла; 6 — пластина замера $P_{ст}$; 7 — гребенка замера P^* ; 8 — гребенка замера P^* , $h = \begin{cases} 3 \text{ мм} - \text{с решеткой \# 1.} \\ 27 \text{ мм} - \text{с решеткой \# 2.} \end{cases}$

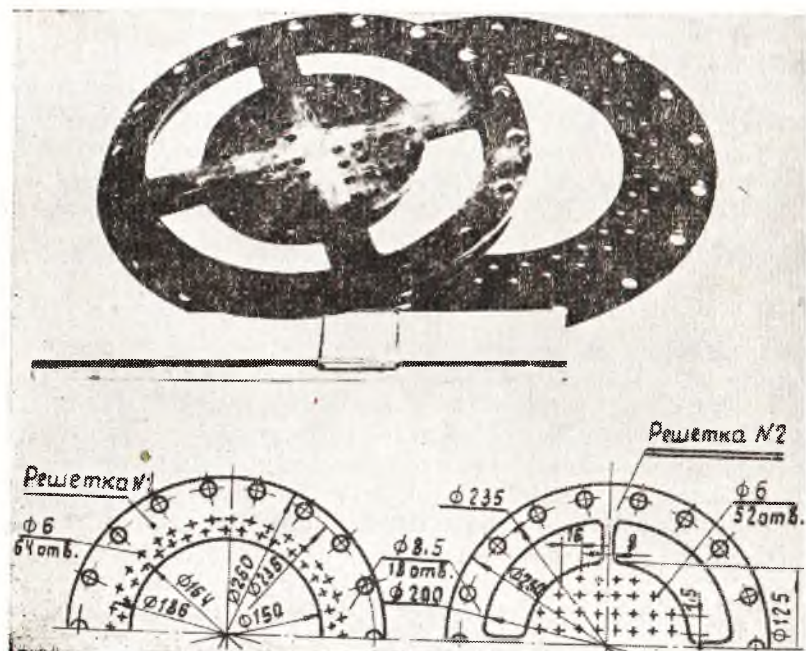


Рис. 4. Решетки-имитаторы неравномерного поля давления на входе в сопло

ция, определяемая по $\pi(\lambda_i) = \frac{p_i}{p_i^*}$, где p_i ; p_i^* — замеренные величины статического и полного давления в i -ом участке рассматриваемого поперечного сечения. (Поле $p_i = f(\bar{r})$ уточнялось по измеренной величине $G_{в.о.}$).

Величина $f(\lambda_{вх})$ определялась по газодинамической функции

$$z(\lambda_{вх}) = \frac{\sum f(\lambda_i) p_i^* \Delta F}{\sum q(\lambda_i) p_i^* \Delta F_{i=0,0404}},$$

в которой

$$q(\lambda_i) = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_i^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_i.$$

Коэффициент расхода исследуемого сопла определялся как отношение

$$\nu = \frac{G}{G_T}. \quad (2)$$

Здесь G — действительный расход газа;

G_T — теоретический расход газа при изэнтропическом одномерном процессе истечения через сопло тех же геометрических размеров при одинаковых полных параметрах на входе.

Коэффициент тяги сопла равен

$$\bar{R} = \frac{R}{R_T}. \quad (3)$$

Здесь R — действительная тяга сопла;

R_T — теоретическая тяга сопла при полном изэнтропическом расширении потока, имеющего действительный приведенный расход, при тех же полных параметрах на входе.

В данном исследовании тяга подсчитывалась по формуле

$$R = (p_{вх}^* - p_n) F - \Delta R_c, \quad (4)$$

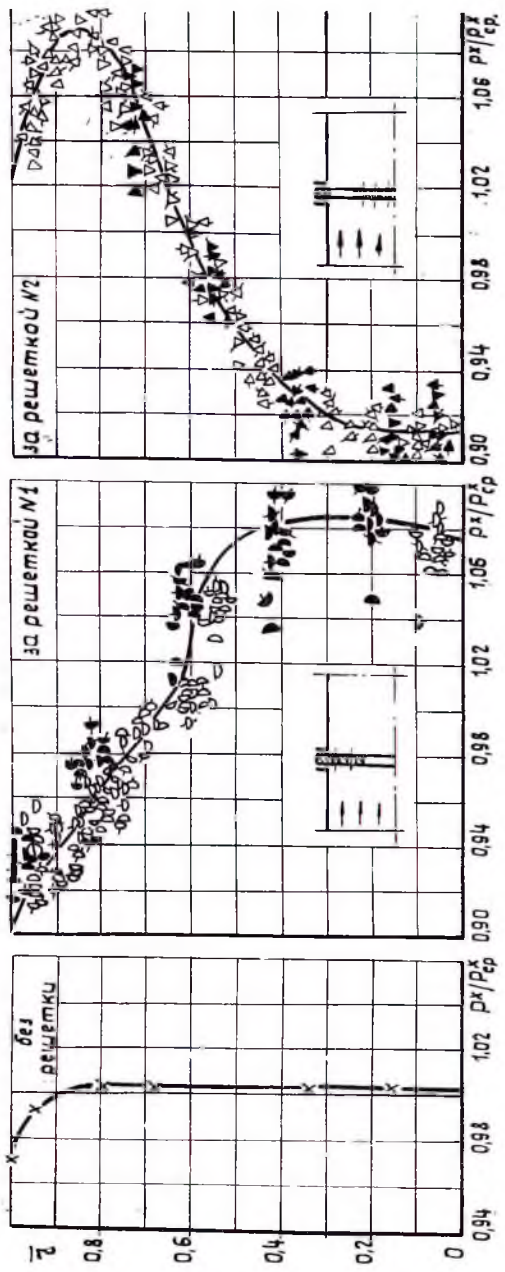
где $(p_{вх}^* - p_n) F$ — сила, приложенная к торцу условного цилиндра с площадью, равной площади на входе в исследуемое сопло;

$p_{вх}^* = \pi_c^* \cdot p_n$ — осредненное давление на входе в сопло;

ΔR_c — проекция на ось сопла силы, действующей на внутреннюю поверхность его и определяемой графическим интегрированием эпюры статических давлений вдоль образующей насадка.

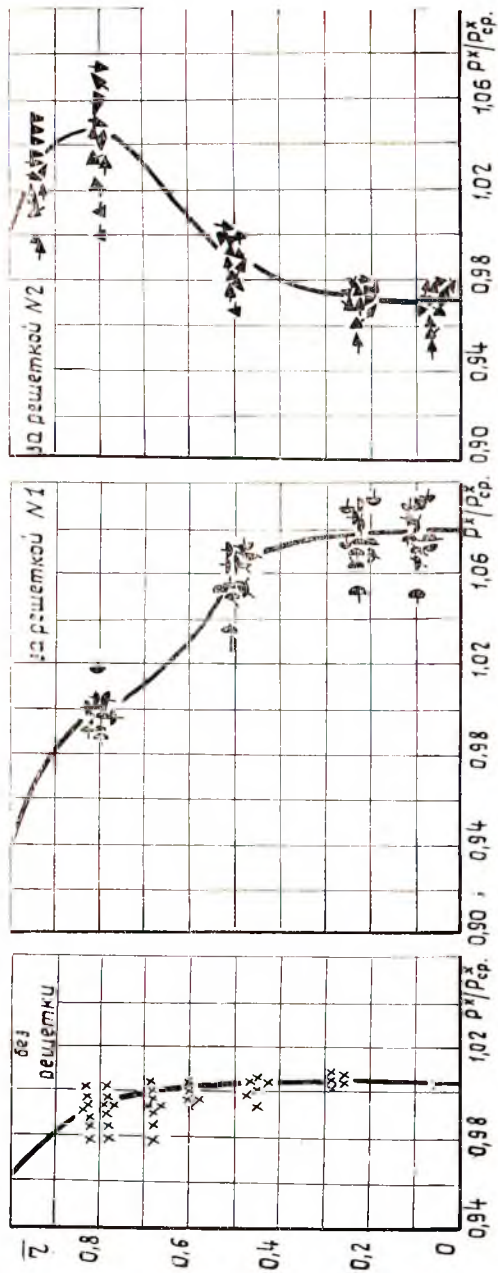
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Поля давлений. Замеренные поля полных давлений за решетками-имитаторами на входе в сопло в виде зависимости



Параметр	Угол атаки $\alpha = 30^\circ$										Угол атаки $\alpha = 60^\circ$													
	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20		
М1	1.39	1.90	2.26	2.67	3.63	4.91	7.22	9.59	13.64	18.41	22.92	27.92	33.62	40.12	47.11	54.92	63.67	73.59	84.19	95.44	107.44	120.28	133.82	
М2	1.35	1.86	2.17	2.58	3.49	4.85	6.52	8.52	10.83	13.50	16.58	19.92	23.53	27.48	31.70	36.21	41.01	46.12	51.52	57.21	63.19	69.46	76.01	82.85

Рис. 5. Поля полных давлений на входе в сопло (светлые точки — сборка № 1; темные точки — № 2).



Решетка	$\delta_c = 0$			$\delta_c = 30^\circ$			$\delta_c = 60^\circ$								
	▲	■	●	▽	○	◐	▷	◑	▶						
N=1	1,33	1,91	2,25	2,69	3,54	4,42	1,90	2,23	2,67	3,59	4,42	1,94	2,26	2,73	3,62
N=2	1,35	1,85	2,18	2,60	3,50	4,40	1,86	2,19	2,64	3,52	4,42	1,93	2,25	2,70	3,65

Рис. 6. Поля полных давлений на срезах сопла (сборка 2)

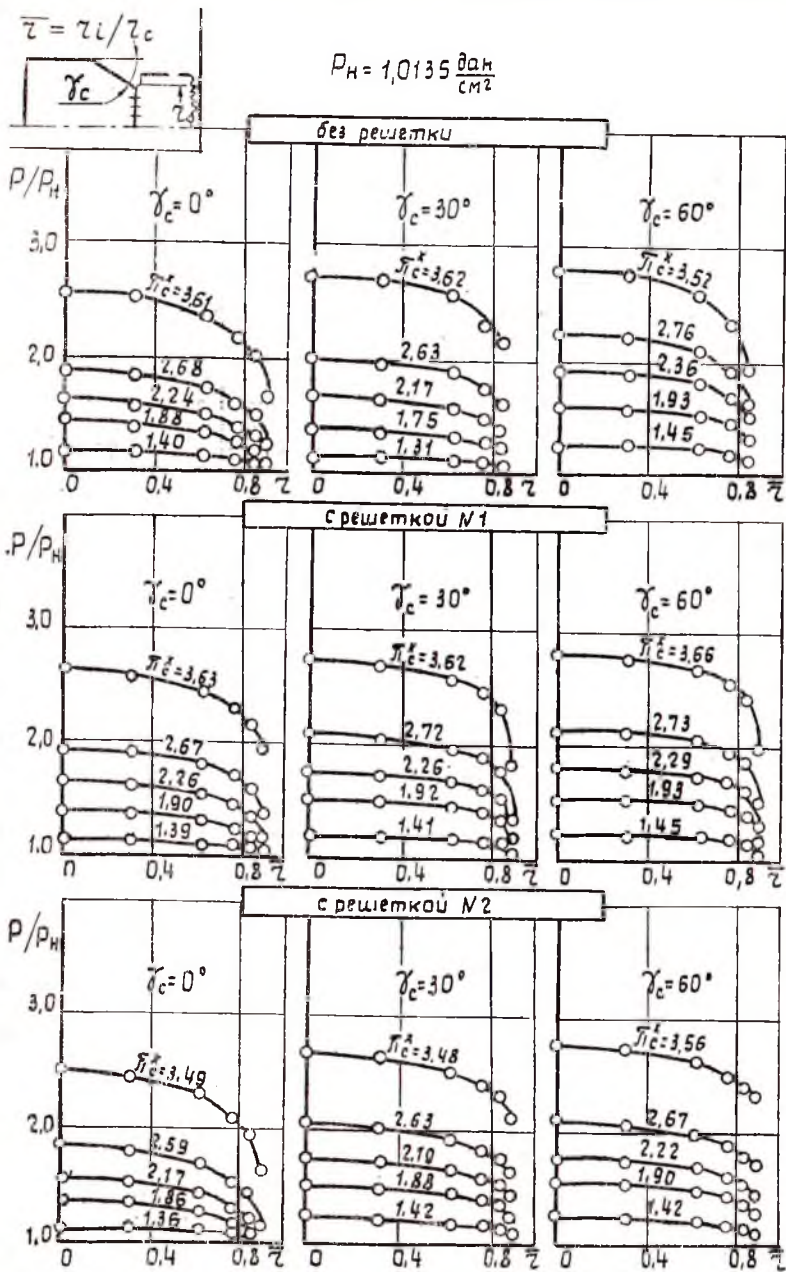
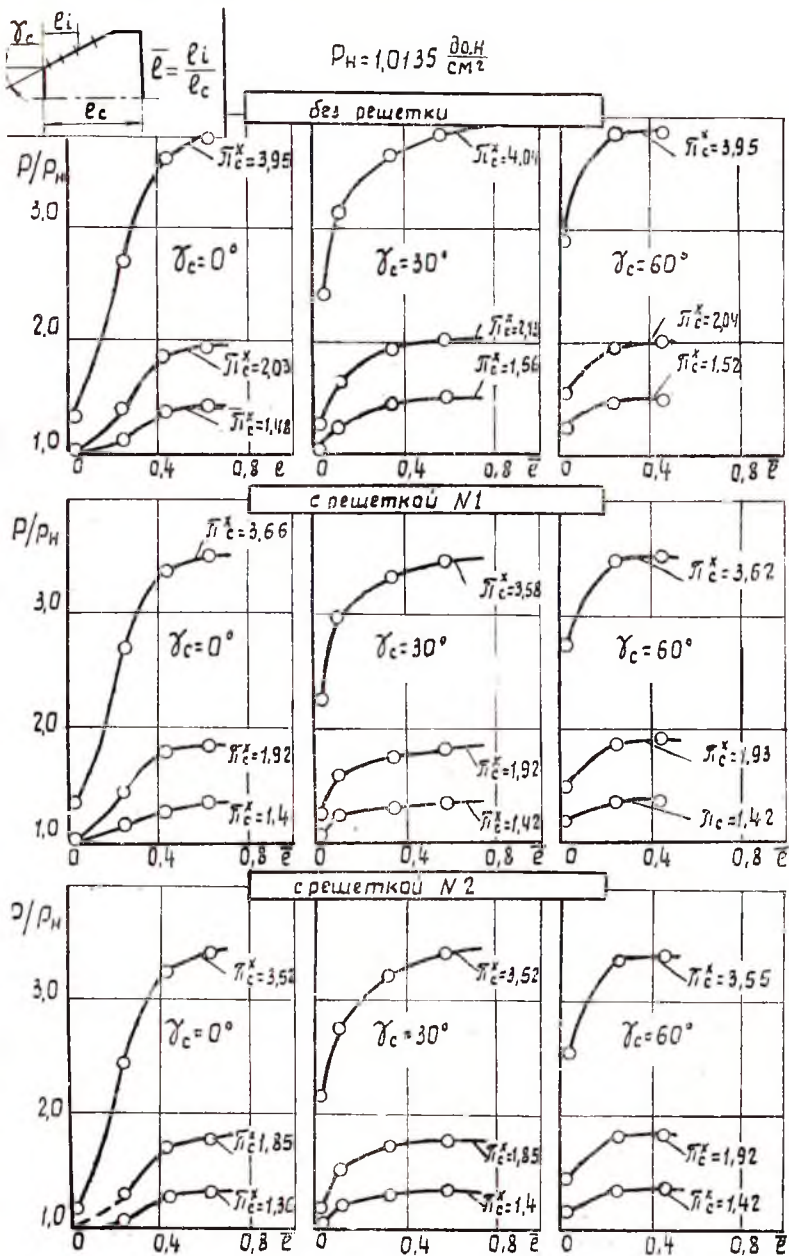


Рис. 7. Поля статических давлений на срезе сопла



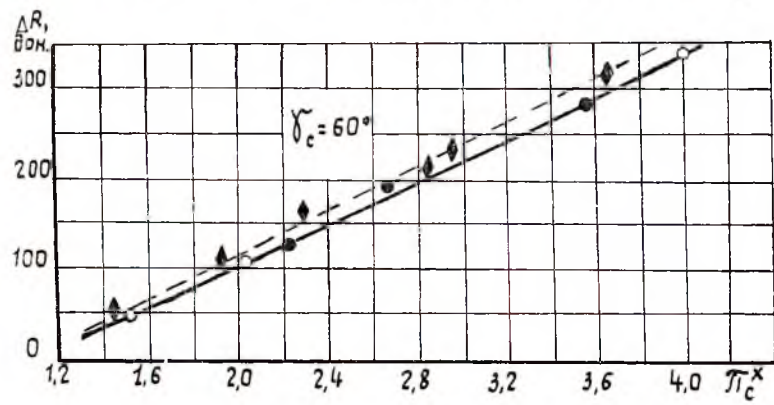
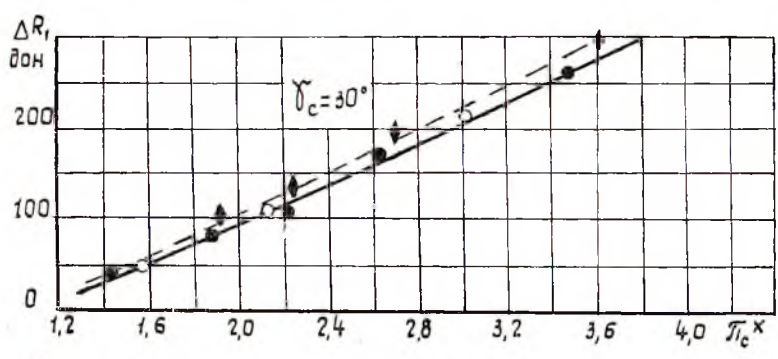
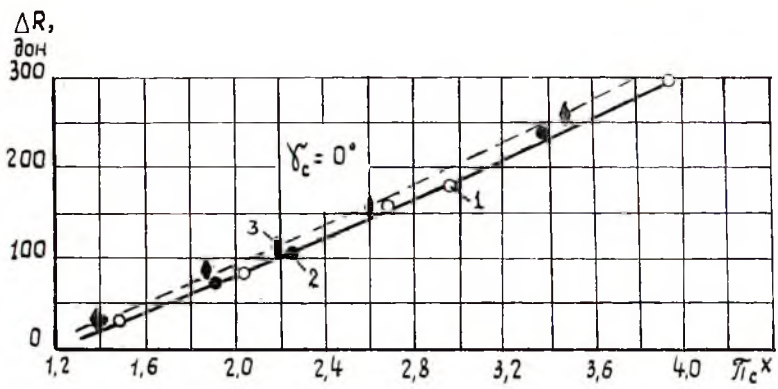


Рис. 9. Силы, действующие на сужающееся сопло
 1 — без решетки; 2 — с решеткой № 1; 3 — с решеткой № 2

$$\delta M_{рх} = \frac{M_{с\text{равн } рх} - M_{с\text{ нер. } рх}}{M_{с\text{равн } рх}}$$

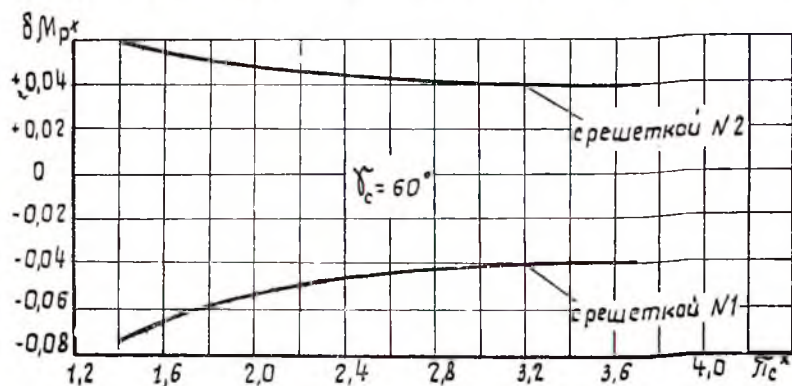
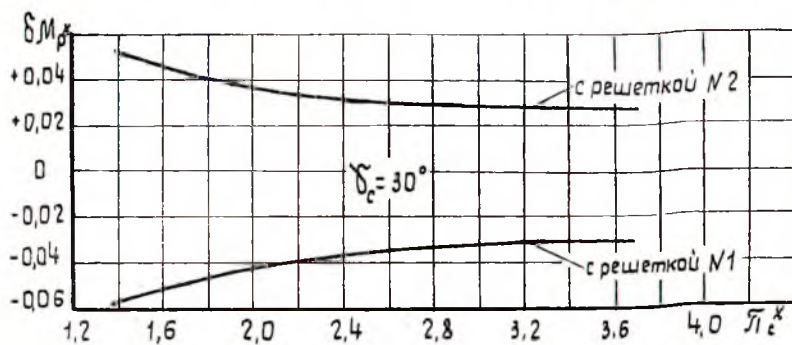
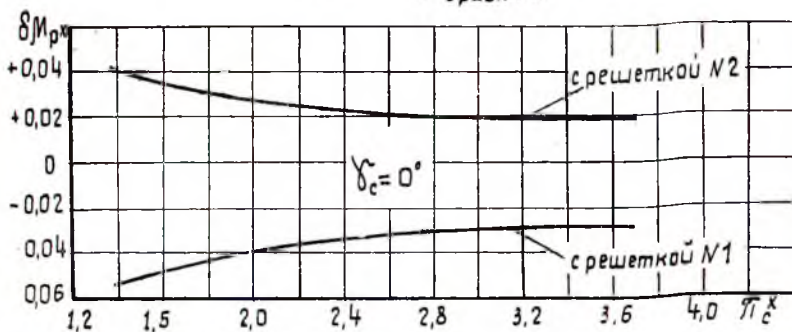


Рис. 10. Влияние неравномерности полного давления на коэффициент расхода сужающихся сопел

$\frac{p^*}{p_{вх}^*} = f(\bar{r} = \frac{r}{R_{вх}}, \pi_c^*, \gamma_c)$ в сравнении со случаем течения равномерного потока представлены на рис. 5. Решетка № 1 имитирует «выпуклое» поле p^* , а решетка № 2 — «вогнутое» поле p^* ; интенсивность неравномерности обоих полей составляет $7 \div 9\%$.

Замеры p^* на срезе сопел (рис. 6) показали, что при течении к выходу происходит некоторое выравнивание поля вследствие взаимодействия между отдельными струйками тока. Причем это взаимодействие более интенсивно при «вогнутом» поле и большем угле γ_c .

На рис. 7 приведены поля статических давлений на срезе сопла в виде зависимостей $\frac{p}{p_{пн}} = f(\pi_c^*, \gamma_c, \bar{r})$. Из рассмотрения полей следует, что при одинаковом π_c в случае «вогнутого» поля наблюдается более сильное влияние угла γ_c на распределение давления, чем в случае «выпуклого». Вблизи стенки сопла $\bar{r} \geq 0,85$.

Коэффициент тяги. Результаты замеров распределения статического давления по контуру сопел показаны на рис. 8 в виде зависимостей $\frac{p}{p_{пн}} = f(\pi_c^*, \gamma_c, \bar{l} = \frac{l}{r_{кр}})$. Эти зависимости служили в качестве исходных для расчета ΔR_c и \bar{R} . Результаты расчета, представленные на рис. 9, показывают, что при «выпуклых» полях $p_{вх}^*$ значения ΔR_c практически совпадают со значениями ΔR_c при равномерном поле $p_{вх}^*$. При «вогнутом» поле $p_{вх}^*$ значения ΔR_c превышают упомянутые ранее, что приводит к уменьшению \bar{R} , подсчитанному по (3), на $0,003 \div 0,005$.

Коэффициент расхода. В эксперименте удалось установить влияние входной неравномерности p на коэффициент, подсчитанный по формуле (2). На рис. 10 показана зависимость $\delta\mu_{p^*} = \frac{\mu_c - \mu_{снер}}{\mu_c}$ (μ_c — коэффициент расхода при равномерном p^* , $\mu_{снер}$ — при неравномерном поле p^*) от угла γ_c и режима работы π_c^* . Для всех исследованных сопел «выпуклое» поле p^* увеличивает μ_c , а «вогнутое» — уменьшает. С ростом π_c^* абсолютное значение $\delta\mu_c$ уменьшается и при $\pi_c^* \geq 3,0$ остается практически неизменным.

Увеличение γ_c от 0 до 60° приводит к росту $\delta\mu_c$ на $\sim 0,02$ в области $\pi_c^* = 1,4 \div 4,0$. Для сопла Витошинского ($\gamma_c = 0$) величина $\delta\mu_c$ составляет $0,04 \div 0,02$, а для сопла № 3 ($\gamma_c = 60^\circ$) $\delta\mu_c = -0,06 \div -0,04$ в указанном диапазоне π_c^* .

ВЫВОДЫ

Исследование сужающихся сопел с входным диаметром 180 мм, с отношением площадей входа и выхода $2,0$ и углами конуса 0° , 30° и 60° в диапазоне $\pi_c^* = 1,2 \div 4,0$ с различными полями полного давления на входе при интенсивности неравномерности $\sim 10\%$ выявило следующие особенности:

1. «Выпуклое» поле $p_{вх}^*$ приводит к увеличению, а «вогнутое» к уменьшению коэффициента расхода μ_c по сравнению с равномерным полем $p_{вх}^*$ при одинаковом значении π_c^* . Отклонения величин μ_c составляют $4 \div 2\%$ при $\pi_c^* = 1,2 \div 4,0$.

2. Неравномерность поля $p_{вх}^*$ приводит к ухудшению коэффициента тяги сопла на $\sim 0,5\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. Госэнергоиздат, 1961.
2. Аронов Б. М., Денисов И. Н., Цыбизов Ю. И. Исследование сверхзвукового эжекторного сопла с короткой камерой смешения, Труды КуАИ, № 45, 1971.
3. Дорофеев В. М., Левин В. Я. Испытания воздушно-реактивных двигателей. Оборонгиз, 1961.
4. Седов Л. И., Черный Г. Г. Об осреднении неравномерных потоков газа в каналах. Теоретическая гидромеханика, сб. статей № 12. М., Оборонгиз, 1954.

УДК 621.45.00.111.

Е. Д. Стенькин

ВНУТРЕННЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (ТЯГА) ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА РЕЖИМЕ АВТОРОТАЦИИ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

R — внутреннее сопротивление (реактивная тяга) двигателя;
 G_v — весовой расход воздуха;
 $y = \frac{G_{вII}}{G_{вI}}$ — степень двухконтурности: отношение расхода воздуха через наружный контур к расходу через основной контур;
 v — скорость полета;
 G_5 — скорость истечения воздуха из реактивного сопла;
 F_5 — площадь сечения на выходе из реактивного сопла;
 g — ускорение силы тяжести;
 p_n — атмосферное давление;
 T_n — атмосферная температура;
 R — газовая постоянная;
 M — число М;
 λ — число λ ;
 σ — коэффициент восстановления полного давления;
 $\tau(\lambda)$, $\pi(\lambda)$, $y(\lambda)$ — газодинамические функции числа λ [1],
 k — показатель адиабаты;

$$\overline{R} = \frac{R}{p_n F_5}$$

ИНДЕКСЫ

верхний:
 * — полный параметр;
 нижние:
 В — вентилятор;
 Вх — вход;
 д — двигатель;
 диф. — диффузор;
 п — полет;
 пр. ск. — прямой скачок;
 с — сопло;
 см — смешение;
 с. у. — силовая установка;
 ф. к. — форсажная камера;
 5 — сечение на выходе из реактивного сопла;
 I — основной контур;
 II — наружный контур;
 эк — экстремальный;
 max — максимальный;
 max max — максимум-максимум;

В процессе эксплуатации многодвигательного самолета возможно выключение отдельных двигателей, которые в этих случаях