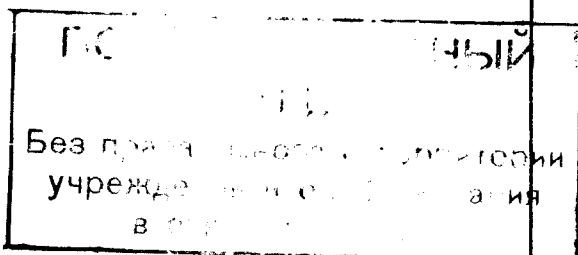


пр. уаа
А - 471.

Экз. № 0140

НАРОДНЫЙ КОМИССАРИАТ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. проф. Н. Е. Жуковского



ТРУДЫ ЦАГИ

ИСПЫТАНИЕ В СКОРОСТНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ
ЦАГИ Т-106 НОВЫХ ВИНТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ЦАГИ ВС-6
и ВС-8 И ВИНТОВОГО ПРОФИЛЯ Ф

Р. Н. Алексеева, А. П. Ковалев, Л. А. Симонов

ИЗДАТЕЛЬСТВО БЮРО НОВОЙ ТЕХНИКИ НКАП

1944

п. в. 10/22с.

ИСПЫТАНИЕ В СКОРОСТНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ЦАГИ Т-106 НОВЫХ ВИНТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ЦАГИ ВС-6 И ВС-8 И ВИНТОВОГО ПРОФИЛЯ Ф

Р. Н. АЛЕКСЕЕВА, А. П. КОВАЛЕВ, Л. А. СИМОНОВ

от 23/III 4/8с
Подпись 61

ВВЕДЕНИЕ

Характеристика винта — к. п. д. его при различных режимах полета — сильно зависит от профилей, из которых составлен винт, поэтому одним из основных средств улучшения ее является создание новых винтовых профилей с более высоким качеством при больших скоростях. С этой целью и была проведена в ЦАГИ работа по проектированию новых винтовых профилей и испытанию их в аэродинамической трубе ЦАГИ Т-106.

Знание аэродинамических характеристик профилей при больших скоростях, кроме того, необходимо для правильного выбора основных параметров винта: диаметра, редукции и покрытия.

Основными особенностями условий работы винтовых профилей являются большие скорости и большие коэффициенты подъемной силы. Относительные скорости меняются от скорости полета — у втулки — до скорости, нередко достигающей скорости звука — на конце лопасти. Коэффициенты подъемной силы c_y в условиях полета на максимальной скорости обычно равны $0,35 \div 0,5$, а при режимах разбега и набора высоты профили работают на больших углах атаки вблизи $c_{y \max}$ или даже за $c_{y \max}$.

На винтовых профилях вследствие больших скоростей и больших значений c_y возникают местные скорости, большие скорости звука. Переход от сверхзвуковых скоростей к дозвуковым сопровождается волновыми потерями, сильно увеличивающими сопротивление профилей [1]¹. Волновые потери особенно велики в концевых сечениях лопастей винтов и составляют главную часть всех потерь винта.

Для того, чтобы уменьшить волновые потери, применяют возможно более тонкие профили, так как увеличение толщины вызывает дополнительное увеличение местных скоростей. В основной части лопасти (на относительных радиусах $\bar{r} = 0,6 \div 0,8$) обычно применяют профили с относительной толщиной порядка $\bar{c} = 0,06$, а на концах относительная толщина доходит до $\bar{c} = 0,04$.

Наибольший интерес поэтому представляет получение характеристик профилей с $\bar{c} = 0,04 \div 0,06$ при возможно больших числах Маха. По условиям прочности оказалось невозможным испытывать тонкие профили с $\bar{c} = 0,04$, поэтому пришлось ограничиться испытаниями профилей с $\bar{c} = 0,06$. Условия работы таких профилей характеризуются следующими значениями чисел Маха и коэффициента подъемной силы: 1) на режиме максимальной скорости полета: $M = 0,7 \div 0,85$, $c_y = 0,35 \div 0,5$ (для высотных винтов нужны более высокие значения c_y); 2) режим набора высоты и разбега: $M = 0,6 \div 0,75$, $c_y = c_{y \max}$.

В настоящей работе даны результаты испытаний при больших скоростях в трубе Т-106 широко употребляемого профиля Ф и двух новых профилей ЦАГИ.

§ 1. ПРОФИЛИ Ф, ЦАГИ ВС-6, ЦАГИ ВС-8 И СРАВНЕНИЕ ИХ С ДРУГИМИ ВИНТОВЫМИ ПРОФИЛЯМИ

При скорости набегающего потока, называемой критической (при критическом числе Маха $M_{кр}$), на профиле начинают появляться области со сверхзвуковыми скоростями. Этот момент совпадает с началом быстрого роста профильного сопротивления, поэтому одним из средств уменьшения потерь при больших скоростях является увеличение $M_{кр}$ профиля.

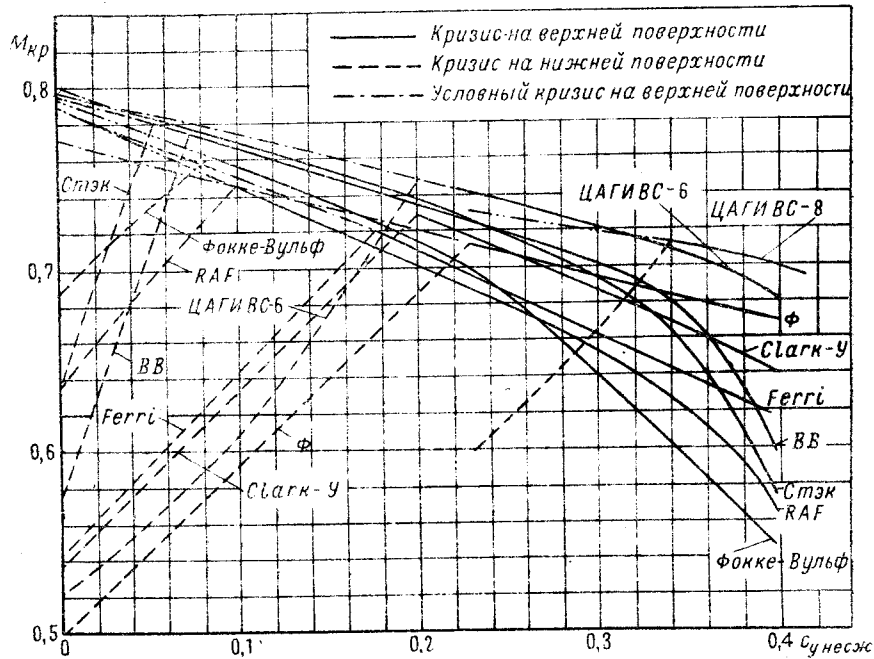
Критическое число Маха является функцией минимального давления \bar{p}_{\min} эпюры рас-

¹ См. список литературы в конце статьи. Цифра в квадратных скобках обозначает номер по списку статьи, на которую делается ссылка.

предела давления при обтекании несжимаемой жидкостью [2]; $M_{кр}$ будет тем выше, чем меньше абсолютная величина \bar{p}_{min} .

Для большого числа винтовых профилей был проведен расчет теоретического распределения давления при различных c_y [3] методом Я. М. Серебрянского [4] и таким образом найдены значения $M_{кр}$ в зависимости от коэффициента подъемной силы в потоке несжимаемой жидкости $c_{y, несж}$ (фиг. 1).

На фиг. 1 даны $M_{кр}$ в функции от $c_{y, несж}$ также для новых профилей ЦАГИ ВС-6 и ЦАГИ ВС-8; из этих кривых видно, что профиль ЦАГИ ВС-6 на большом диапазоне c_y имеет самые высокие значения $M_{кр}$. Профиль ЦАГИ ВС-8 при $c_{y, несж} > 0,32$ имеет более высокие $M_{кр}$, чем профиль ЦАГИ ВС-6, однако это получено ценой ухудшения свойств профиля при малых c_y .

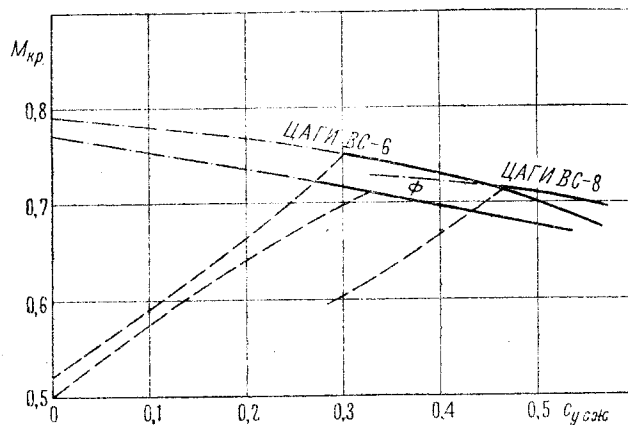


Фиг. 1. Волновой кризис различных винтовых профилей с $\bar{c} = 6\%$

При неизменном угле атаки c_y увеличивается с числом Маха:

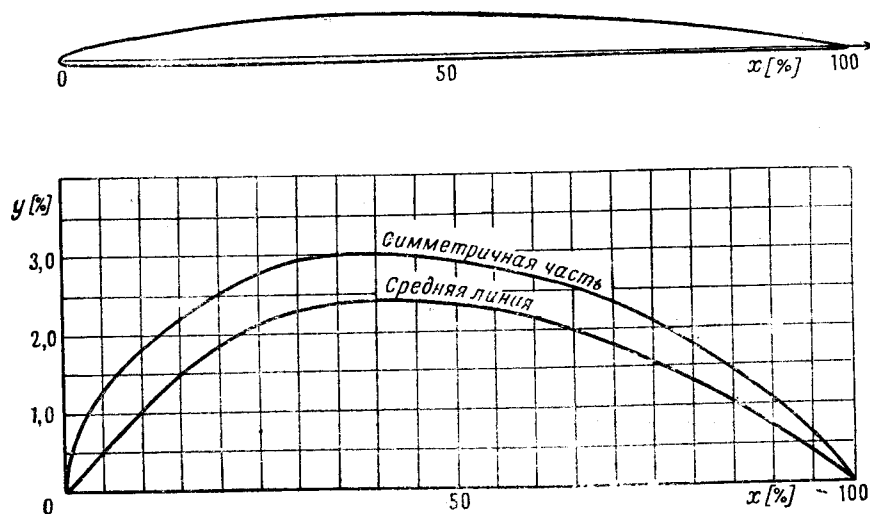
$$c_{y, несж} = \frac{c_{y, несж}}{\sqrt{1 - M^2}}.$$

На фиг. 2 даны $M_{кр}$ для трех наиболее интересных профилей в зависимости от $c_{y, несж}$, подсчитанного таким образом.

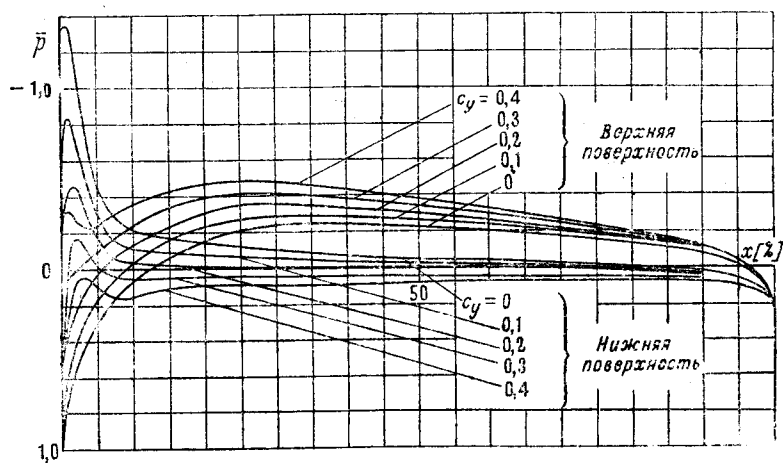


Фиг. 2

Из известных ранее винтовых профилей наиболее высокими числами $M_{кр}$ обладают профили Стэка, профили ВВ и Ф, однако первые два профиля вследствие малой кривизны имеют при больших значениях c_y слишком низкие значения $M_{кр}$; наилучшим являлся профиль Ф (фиг. 3 и 4).



Фиг. 3. Профиль Ф, $\bar{c} = 6\%$



Фиг. 4. Распределение давления по профилю Ф;

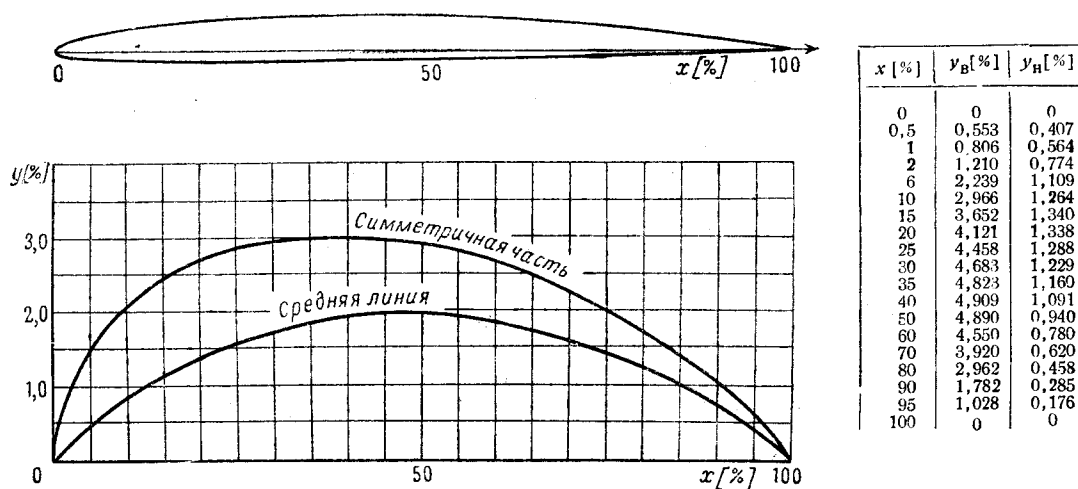
$$\bar{c} = 6\%; \quad \alpha_0 = -2^\circ 31'; \quad \frac{dc_y}{d\alpha_{теор}} = 6,535$$

Испытания винтов, отличающихся только профилями сечений, проведенные Д. В. Халезовым [5], также показали, что винты с профилями Ф при больших скоростях имеют самый высокий к. п. д.

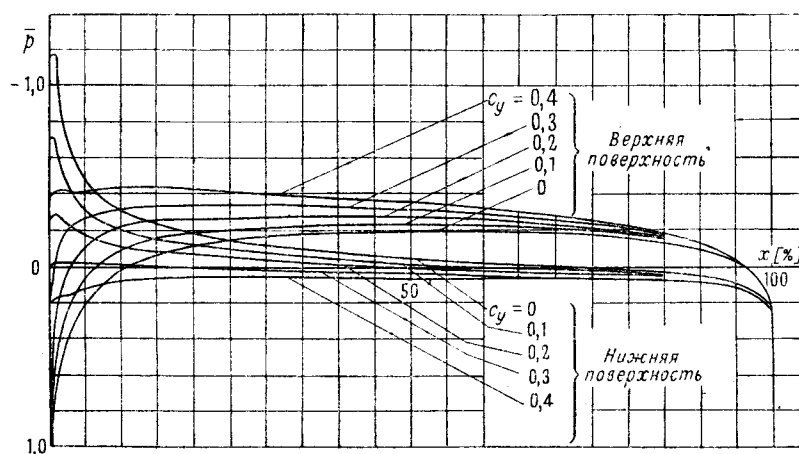
В ЦАГИ была поставлена работа по проектированию новых винтовых профилей, обладающих возможно более высокими значениями $M_{кр}$. Такими свойствами должен обладать тот профиль, на котором распределение давления будет наиболее равномерным при заданном значении c_y .

Я. М. Серебрянским была проведена работа по исследованию влияния геометрических параметров профиля с толщиной $\bar{c} = 0,6$ на распределение давления по его поверхности [6], и найдено, что оптимальное положение максимальной толщины \bar{x}_c равно $\sim 0,4$, максимальной вогнутости \bar{x}_f равно $\sim 0,5$, относительный радиус кривизны носика \bar{r}_n равен $\sim 0,03$. Вогнутость профиля \bar{f} при этом должна выбираться пропорционально значению c_y , при котором работает профиль.

Для режимов $c_{y \text{ несж}} = 0,2 \div 0,4$ Я. М. Серебряйским, Р. Н. Алексеевой и М. В. Рыжковой был спроектирован профиль ЦАГИ ВС-6, вид которого дан на фиг. 5; распределение давления по этому профилю дано на фиг. 6.

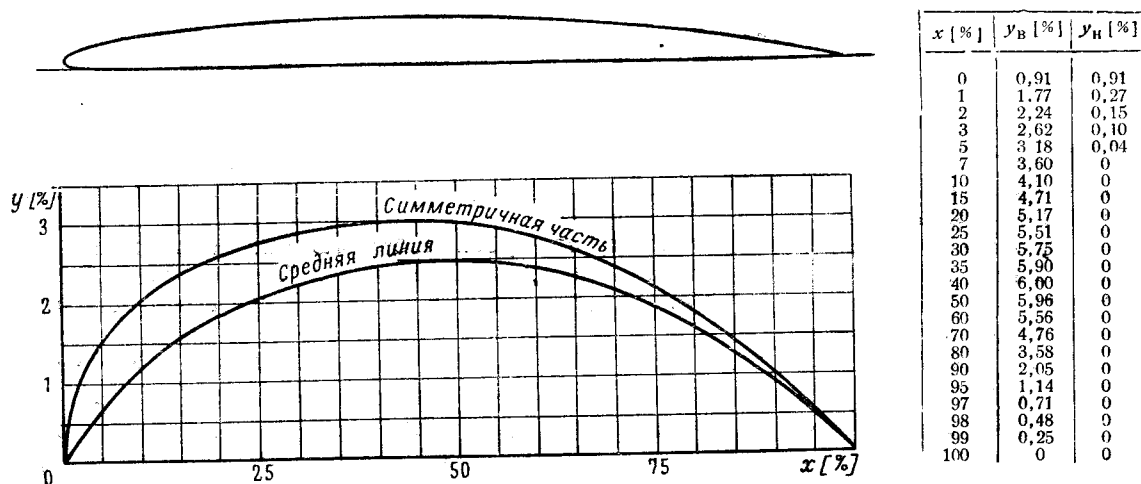


Фиг. 5. Профиль ЦАГИ ВС-6; $\bar{c} = 6\%$



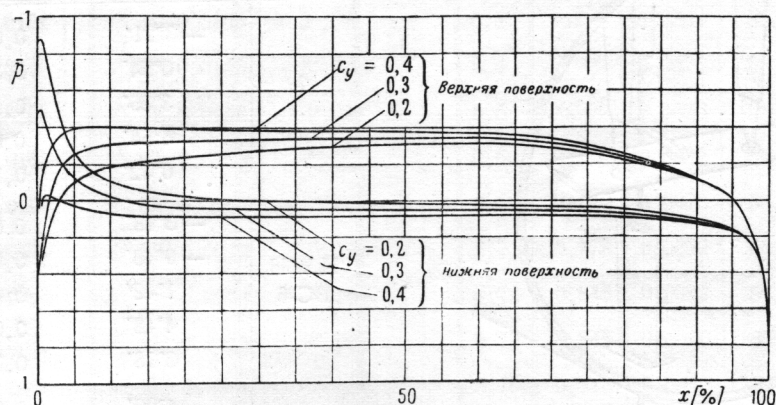
Фиг. 6. Распределение давления по профилю ЦАГИ ВС-6;

$$\bar{c} = 6\%; \alpha_0 = -2^\circ 25'; \frac{dc_y}{dx_{\text{теор}}} = 6,615$$



Фиг. 7. Профиль ЦАГИ ВС-8; $\bar{c} = 6\%$

Позднее Л. А. Симоновым был разработан метод проектирования профилей по заданному на части поверхности профиля распределению давления [7]. Этот метод был применен для проектирования профиля ЦАГИ ВС-8 для режимов высоких c_y . Было принято равномерное распределение давления на большей части верхней поверхности при $c_y = 0,383$ и из соображений удобства изготовления нижняя поверхность выбрана плоской. Вид профиля ЦАГИ ВС-8 дан на фиг. 7; распределение давления по нему дано на фиг. 8.



Фиг. 8. Распределение давления по профилю ЦАГИ ВС-8;

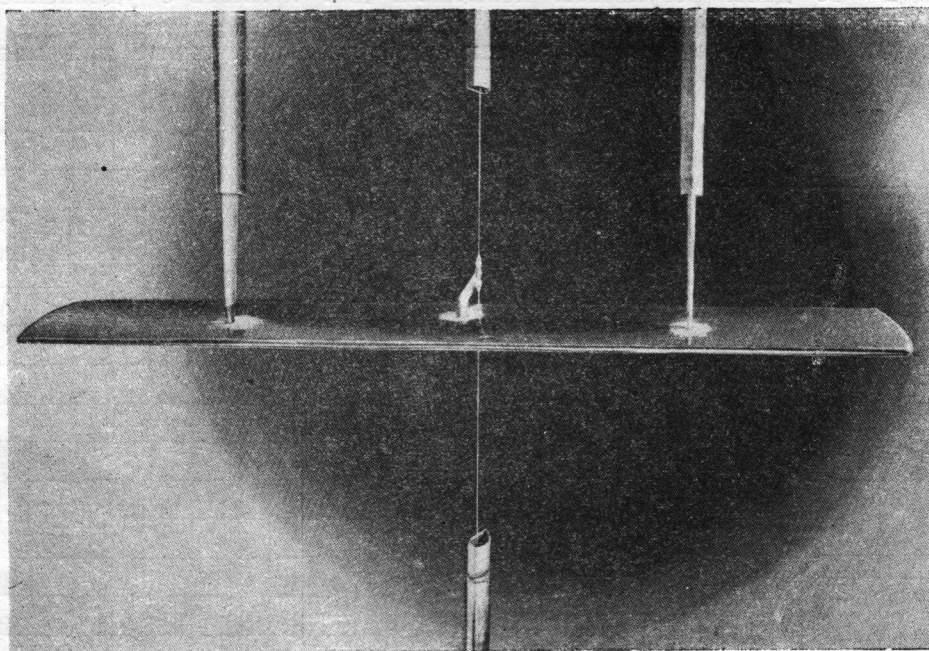
$$\bar{c} = 6\%, \quad \alpha_0 = -3^\circ 30', \quad \frac{dc_y}{d\alpha_{\text{теор}}} = 6,66;$$

Подсчеты теоретического распределения давления и $M_{кр}$ позволяли надеяться, что новые профили будут иметь коэффициенты сопротивления при больших скоростях меньшие, чем у профиля Ф. Три наиболее интересных профиля: Ф, ЦАГИ ВС-6 и ЦАГИ ВС-8, были выбраны для сравнительного испытания при больших скоростях в трубе Т-106.

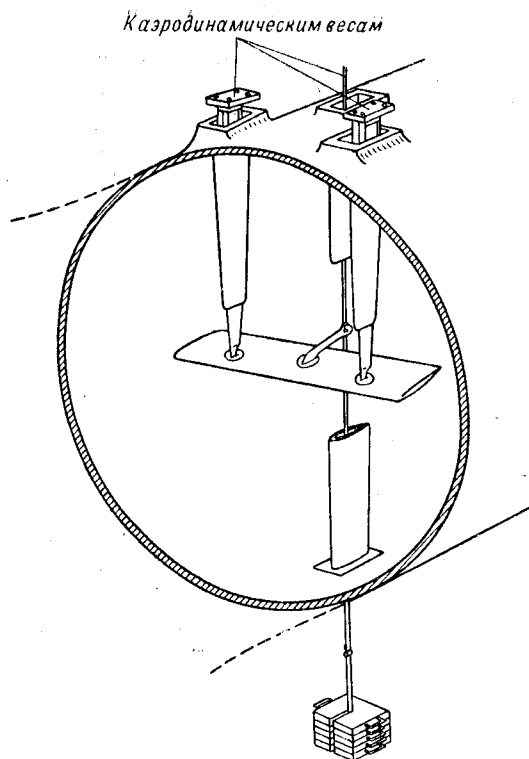
§ 2. ПРОГРАММА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ВИНТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ В Т-106

Испытания профилей велись на моделях прямоугольных крыльев размером $1,5 \times 0,3$ м в трубе Т-106 с диаметром рабочей части $D = 2,6$ м.

Измерения сил производились на весах АВ Т-106 с трехкомпонентной подвеской (фиг. 9 и 10).



Фиг. 9



Фиг. 10. Установка крыла на трехкомпонентной подвеске в Т-106

Таблица 1

Профиль	Геометрический угол атаки модели α_r *	c_y при $M = 0,2$	Диапазон значений числа Маха M по приборам
Ф	$-3^\circ 21'$	0,00	$0,2 \div 0,767$
	$0^\circ 54'$	0,31	$0,2 \div 0,78$
	$3^\circ 36'$	0,52	$0,2 \div 0,765$
	$4^\circ 54'$	0,60	$0,2 \div 0,784$
	$6^\circ 42'$	0,71	$0,2 \div 0,78$
ЦАГИ ВС-6	$-3^\circ 48'$	0,00	$0,2 \div 0,79$
	$-0^\circ 48'$	0,19	$0,2 \div 0,785$
	$1^\circ 42'$	0,40	$0,2 \div 0,786$
	$4^\circ 48'$	0,60	$0,2 \div 0,78$
	$6^\circ 18'$	0,70	$0,2 \div 0,752$
ЦАГИ ВС-8	$-4^\circ 00'$	$-0,02$	$0,2 \div 0,76$
	$-1^\circ 24'$	0,17	$0,2 \div 0,765$
	$1^\circ 18'$	0,38	$0,2 \div 0,765$
	$4^\circ 12'$	0,58	$0,2 \div 0,765$
	$5^\circ 36'$	0,68	$0,2 \div 0,757$

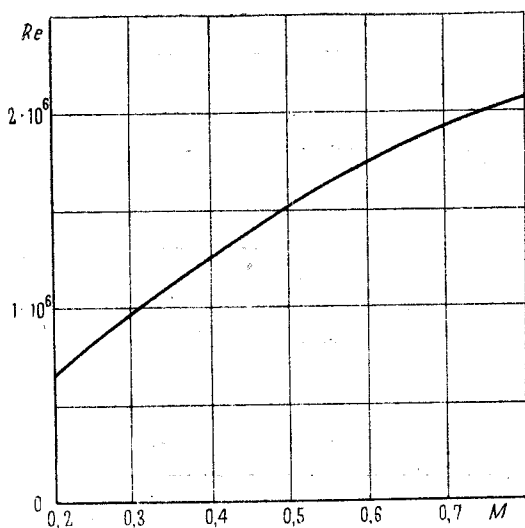
* Углы атаки относительно оси трубы отсчитывались от плоской нижней поверхности профиля.

Порядок испытаний крыловых профилей при больших скоростях и методика учета влияния стенок трубы и поддерживающих устройств описаны в работе [8].

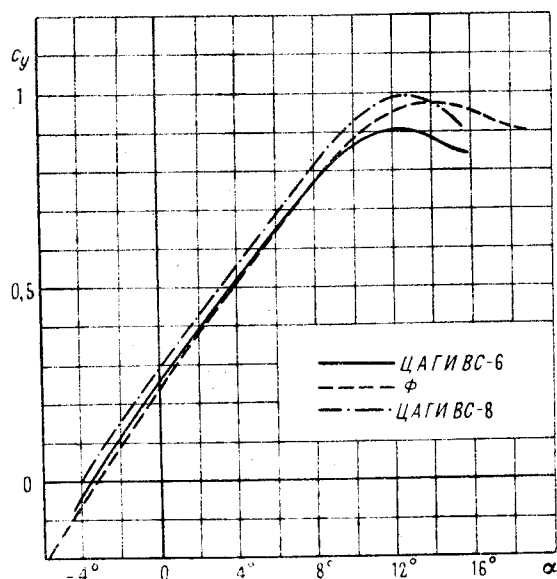
Программа испытаний каждого профиля заключалась в определении коэффициентов лобового сопротивления c_x и подъемной силы c_y при нескольких фиксированных углах атаки и переменной скорости потока. Выбранные углы атаки и диапазон изменения числа Маха потока даны в табл. 1. Начальное давление было понижено до $0,5 \text{ ат}$ с целью уменьшения нагрузок на модель. Получающиеся при этом числа Рейнольдса приведены на фиг. 11.

В табл. 2—16 даны результаты испытаний для крыльев с удлинением $\lambda = 5$ и пересчет на $\lambda = \infty$.

На фиг. 12 даны графики $c_y(\alpha)$ для всех профилей, полученные при малых скоростях потока (80 м/сек).



Фиг. 11



Фиг. 12

Таблица 2

Профиль Ф; $\alpha_r = -3^\circ,35$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,3	0	0,0136	$-3^\circ,35$	0,0136	$-3^\circ,35$
0,4	0	0,0145	$-3^\circ,35$	0,0145	$-3^\circ,35$
0,5	-0,012	0,0158	$-3^\circ,34$	0,0158	$-3^\circ,30$
0,6	-0,023	0,0185	$-3^\circ,33$	0,0185	$-3^\circ,23$
0,66	-0,031	0,0200	$-3^\circ,33$	0,0200	$-3^\circ,20$
0,7	-0,038	0,0219	$-3^\circ,33$	0,0219	$-3^\circ,18$
0,74	-0,043	0,0264	$-3^\circ,32$	0,0264	$-3^\circ,15$
0,78	-0,056	0,0372	$-3^\circ,31$	0,0372	$-3^\circ,08$
0,796	-0,064	0,0450	$-3^\circ,31$	0,0450	$-3^\circ,05$

Таблица 3

Профиль Ф; $\alpha_r = 0^\circ,9$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,3	0,322	0,0125	$1^\circ,10$	0,0056	$-0^\circ,26$
0,4	0,325	0,0130	$1^\circ,10$	0,0060	$-0^\circ,27$
0,5	0,332	0,0146	$1^\circ,10$	0,0073	$-0^\circ,28$
0,6	0,341	0,0170	$1^\circ,11$	0,0093	$-0^\circ,31$
0,66	0,355	0,0190	$1^\circ,12$	0,0168	$-0^\circ,33$
0,7	0,371	0,0205	$1^\circ,13$	0,0115	$-0^\circ,37$
0,74	0,398	0,0229	$1^\circ,15$	0,0126	$-0^\circ,45$
0,78	0,430	0,0290	$1^\circ,16$	0,0170	$-0^\circ,57$
0,796	0,442	0,0740	$1^\circ,17$	0,0212	$-0^\circ,60$

Таблица 4

Профиль Ф; $\alpha_r = 3^\circ,6$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,3	0,530	0,0261	$3^\circ,92$	0,0075	$1^\circ,69$
0,4	0,540	0,0270	$3^\circ,94$	0,0077	$1^\circ,67$
0,5	0,560	0,0293	$3^\circ,95$	0,0088	$1^\circ,61$
0,6	0,590	0,0319	$3^\circ,96$	0,0091	$1^\circ,53$
0,66	0,615	0,0348	$3^\circ,98$	0,0099	$1^\circ,46$
0,7	0,640	0,0388	$3^\circ,99$	0,0120	$1^\circ,39$
0,74	0,675	0,0480	$4^\circ,02$	0,0183	$1^\circ,30$
0,78	0,725	0,0640	$4^\circ,04$	0,0298	$1^\circ,13$
0,796	0,690	0,0720	$4^\circ,02$	0,0398	$1^\circ,25$

Таблица 5

Профиль Ф; $\alpha_r = 4^\circ,9$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,3	0,610	0,0369	$5^\circ,27$	0,0123	$2^\circ,70$
0,4	0,630	0,0375	$5^\circ,28$	0,0114	$2^\circ,64$
0,5	0,658	0,0395	$5^\circ,30$	0,0110	$2^\circ,56$
0,6	0,700	0,0432	$5^\circ,33$	0,0110	$2^\circ,45$
0,66	0,735	0,0476	$5^\circ,35$	0,0122	$2^\circ,33$
0,7	0,778	0,0532	$5^\circ,37$	0,0138	$2^\circ,21$
0,74	0,845	0,0692	$5^\circ,41$	0,0229	$2^\circ,01$
0,78	0,845	0,0890	$5^\circ,42$	0,0428	$2^\circ,02$
0,796	0,813	0,0940	$5^\circ,40$	0,0510	$2^\circ,14$

Таблица 6

Профиль Ф; $\alpha_r = 6^\circ,7$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,3	0,715	0,0540	$7^\circ,14$	0,0204	$4^\circ,12$
0,4	0,740	0,0559	$7^\circ,15$	0,0197	$4^\circ,04$
0,5	0,775	0,0593	$7^\circ,18$	0,0197	$3^\circ,95$
0,6	0,831	0,0634	$7^\circ,22$	0,0179	$3^\circ,78$
0,66	0,895	0,0710	$7^\circ,25$	0,0190	$3^\circ,65$
0,7	0,941	0,0845	$7^\circ,27$	0,0270	$3^\circ,45$
0,74	0,970	0,1020	$7^\circ,28$	0,0410	$3^\circ,38$
0,78	0,955	0,1235	$7^\circ,28$	0,0650	$3^\circ,44$

Таблица 7

Профиль ЦАГИ ВС-6; $\alpha_r = -3^\circ,8$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,3	-0,015	0,0104	$-3^\circ,79$	0,0104	$-3^\circ,73$
0,4	-0,015	0,0095	$-3^\circ,79$	0,0095	$-3^\circ,73$
0,5	-0,017	0,0094	$-3^\circ,79$	0,0094	$-3^\circ,72$
0,6	-0,021	0,0107	$-3^\circ,79$	0,0107	$-3^\circ,70$
0,66	-0,032	0,0110	$-3^\circ,79$	0,0110	$-3^\circ,66$
0,7	-0,036	0,0118	$-3^\circ,79$	0,0118	$-3^\circ,64$
0,74	-0,040	0,0151	$-3^\circ,77$	0,0151	$-3^\circ,61$
0,78	-0,057	0,0223	$-3^\circ,76$	0,0223	$-3^\circ,53$
0,796	-0,070	0,0261	$-3^\circ,76$	0,0261	$-3^\circ,47$
0,81	-0,082	0,0295	$-3^\circ,75$	0,0295	$-3^\circ,43$

Таблица 8
Профиль ЦАГИ ВС-6; $\alpha_r = -0^\circ,8$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,3	0,205	0,0095	$-0^\circ,67$	0,0067	$-1^\circ,53$
0,4	0,210	0,0098	$-0^\circ,67$	0,0069	$-1^\circ,55$
0,5	0,220	0,0098	$-0^\circ,66$	0,0066	$-1^\circ,58$
0,6	0,231	0,0107	$-0^\circ,66$	0,0074	$-1^\circ,61$
0,66	0,239	0,0110	$-0^\circ,65$	0,0073	$-1^\circ,63$
0,7	0,241	0,0112	$-0^\circ,65$	0,0074	$-1^\circ,63$
0,74	0,259	0,0115	$-0^\circ,65$	0,0072	$-1^\circ,69$
0,78	0,289	0,0124	$-0^\circ,64$	0,0070	$-1^\circ,79$
0,796	0,315	0,0149	$-0^\circ,61$	0,0089	$-1^\circ,81$
0,81	0,320	0,0197	$-0^\circ,60$	0,0131	$-1^\circ,85$

Таблица 9
Профиль ЦАГИ ВС-6; $\alpha_r = 1^\circ,7$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,3	0,419	0,0180	$1^\circ,96$	0,0064	$0^\circ,20$
0,4	0,429	0,0185	$1^\circ,96$	0,0063	$0^\circ,14$
0,5	0,440	0,0195	$1^\circ,97$	0,0067	$0^\circ,13$
0,6	0,455	0,0207	$1^\circ,98$	0,0072	$0^\circ,10$
0,66	0,467	0,0220	$1^\circ,98$	0,0077	$0^\circ,06$
0,7	0,482	0,0243	$1^\circ,98$	0,0091	$0^\circ,01$
0,74	0,512	0,0282	$2^\circ,02$	0,0110	$-0^\circ,04$
0,78	0,565	0,0348	$2^\circ,04$	0,0148	$-0^\circ,21$
0,796	0,585	0,0382	$2^\circ,06$	0,0162	$-0^\circ,26$
0,81	0,596	0,0433	$2^\circ,06$	0,0204	$-0^\circ,28$

Таблица 10
Профиль ЦАГИ ВС-6; $\alpha_r = 4^\circ,8$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,3	0,600	0,0344	$5^\circ,11$	0,0103	$2^\circ,59$
0,4	0,620	0,0353	$5^\circ,18$	0,0096	$2^\circ,57$
0,5	0,649	0,0370	$5^\circ,20$	0,0092	$2^\circ,49$
0,6	0,680	0,0410	$5^\circ,21$	0,0107	$2^\circ,39$
0,66	0,723	0,0465	$5^\circ,24$	0,0124	$2^\circ,27$
0,7	0,768	0,0548	$5^\circ,27$	0,0163	$2^\circ,13$
0,74	0,830	0,0735	$5^\circ,30$	0,0285	$1^\circ,96$
0,78	0,870	0,0924	$5^\circ,36$	0,0433	$1^\circ,90$
0,796	0,845	0,0930	$5^\circ,36$	0,0469	$2^\circ,02$

Таблица 11
Профиль ЦАГИ ВС-6; $\alpha_r = 6^\circ,3$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,3	0,710	0,0485	$6^\circ,72$	0,0149	$3^\circ,74$
0,4	0,735	0,0497	$6^\circ,74$	0,0139	$3^\circ,65$
0,5	0,769	0,0527	$6^\circ,76$	0,0137	$3^\circ,54$
0,6	0,815	0,0590	$6^\circ,80$	0,0153	$3^\circ,42$
0,66	0,890	0,0744	$6^\circ,83$	0,0225	$3^\circ,17$
0,7	0,964	0,0904	$6^\circ,86$	0,0298	$2^\circ,92$
0,74	1,029	0,1108	$6^\circ,89$	0,0418	$2^\circ,77$

Таблица 12
Профиль ЦАГИ ВС-8; $\alpha_r = -4^\circ$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,305	-0,020	0,0162	$-3^\circ,99$	0,0162	$-3^\circ,90$
0,356	-0,022	0,0170	$-3^\circ,98$	0,0170	$-3^\circ,89$
0,407	-0,023	0,0183	$-3^\circ,98$	0,0183	$-3^\circ,89$
0,458	-0,025	0,0198	$-3^\circ,98$	0,0198	$-3^\circ,88$
0,510	-0,028	0,0214	$-3^\circ,98$	0,0213	$-3^\circ,87$
0,563	-0,032	0,0233	$-3^\circ,98$	0,0232	$-3^\circ,85$
0,618	-0,039	0,0248	$-3^\circ,97$	0,0247	$-3^\circ,82$
0,641	-0,039	0,0255	$-3^\circ,97$	0,0254	$-3^\circ,82$
0,665	-0,043	0,0260	$-3^\circ,97$	0,0259	$-3^\circ,81$
0,691	-0,043	0,0268	$-3^\circ,97$	0,0267	$-3^\circ,81$
0,718	-0,044	0,0284	$-3^\circ,97$	0,0283	$-3^\circ,80$
0,750	-0,047	0,0308	$-3^\circ,97$	0,0304	$-3^\circ,80$
0,780	-0,051	0,0368	$-3^\circ,96$	0,0337	$-3^\circ,78$
0,796	-0,071	0,0403	$-3^\circ,95$	0,0402	$-3^\circ,75$

Таблица 13
Профиль ЦАГИ ВС-8; $\alpha_r = -1^\circ,4$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,305	0,207	0,0117	$-1^\circ,27$	0,0089	$-2^\circ,12$
0,356	0,209	0,0117	$-1^\circ,27$	0,0089	$-2^\circ,13$
0,407	0,211	0,0117	$-1^\circ,27$	0,0088	$-2^\circ,14$
0,458	0,215	0,0117	$-1^\circ,27$	0,0087	$-2^\circ,15$
0,510	0,217	0,0118	$-1^\circ,27$	0,0088	$-2^\circ,15$
0,563	0,225	0,0119	$-1^\circ,26$	0,0086	$-2^\circ,18$
0,618	0,229	0,0128	$-1^\circ,26$	0,0094	$-2^\circ,19$
0,641	0,232	0,0131	$-1^\circ,26$	0,0096	$-2^\circ,20$
0,665	0,238	0,0135	$-1^\circ,25$	0,0098	$-2^\circ,21$
0,691	0,247	0,0138	$-1^\circ,25$	0,0099	$-2^\circ,24$
0,718	0,260	0,0150	$-1^\circ,24$	0,0106	$-2^\circ,28$
0,750	0,282	0,0172	$-1^\circ,23$	0,0121	$-2^\circ,34$
0,780	0,300	0,0265	$-1^\circ,22$	0,0177	$-2^\circ,39$
0,796	0,326	0,0300	$-1^\circ,20$	0,0232	$-2^\circ,46$

Таблица 14

Профиль ЦАГИ ВС-8; $\alpha_r = 1^\circ,3$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,305	0,412	0,0166	$1^\circ,55$	0,0055	$-0^\circ,16$
0,356	0,413	0,0168	$1^\circ,55$	0,0056	$-0^\circ,17$
0,407	0,421	0,0173	$1^\circ,56$	0,00565	$-0^\circ,18$
0,458	0,431	0,0177	$1^\circ,55$	0,0055	$-0^\circ,21$
0,510	0,444	0,0184	$1^\circ,57$	0,0055	$-0^\circ,26$
0,563	0,454	0,0192	$1^\circ,58$	0,0056	$-0^\circ,28$
0,618	0,474	0,0206	$1^\circ,59$	0,0060	$-0^\circ,35$
0,641	0,480	0,0210	$1^\circ,59$	0,0060	$-0^\circ,36$
0,665	0,486	0,0218	$1^\circ,60$	0,0064	$-0^\circ,37$
0,691	0,503	0,0230	$1^\circ,60$	0,00655	$-0^\circ,43$
0,718	0,519	0,0248	$1^\circ,61$	0,0073	$-0^\circ,48$
0,750	0,549	0,0276	$1^\circ,62$	0,0081	$-0^\circ,57$
0,780	0,997	0,0347	$1^\circ,66$	0,0118	$-0^\circ,70$
0,796	0,603	0,0415	$1^\circ,66$	0,0181	$-0^\circ,72$

Таблица 15

Профиль ЦАГИ ВС-8; $\alpha_r = 4^\circ,2$

М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,305	0,610	0,0328	$4^\circ,57$	0,0082	$1^\circ,99$
0,356	0,620	0,0330	$4^\circ,58$	0,0077	$2^\circ,00$
0,407	0,632	0,0334	$4^\circ,59$	0,0072	$1^\circ,96$
0,458	0,645	0,0345	$4^\circ,59$	0,0071	$1^\circ,91$
0,510	0,665	0,0360	$4^\circ,61$	0,0070	$1^\circ,85$
0,563	0,685	0,0377	$4^\circ,62$	0,0069	$1^\circ,79$
0,618	0,704	0,0405	$4^\circ,63$	0,0080	$1^\circ,73$
0,641	0,715	0,0423	$4^\circ,64$	0,0089	$1^\circ,71$
0,665	0,728	0,0449	$4^\circ,64$	0,0102	$1^\circ,65$
0,691	0,753	0,0507	$4^\circ,66$	0,0137	$1^\circ,59$
0,718	0,796	0,0603	$4^\circ,68$	0,0190	$1^\circ,45$
0,750	0,861	0,0747	$4^\circ,73$	0,0265	$1^\circ,25$
0,780	0,873	0,0863	$4^\circ,73$	0,0369	$1^\circ,23$
0,796	0,843	0,0909	$4^\circ,79$	0,0447	$1^\circ,40$

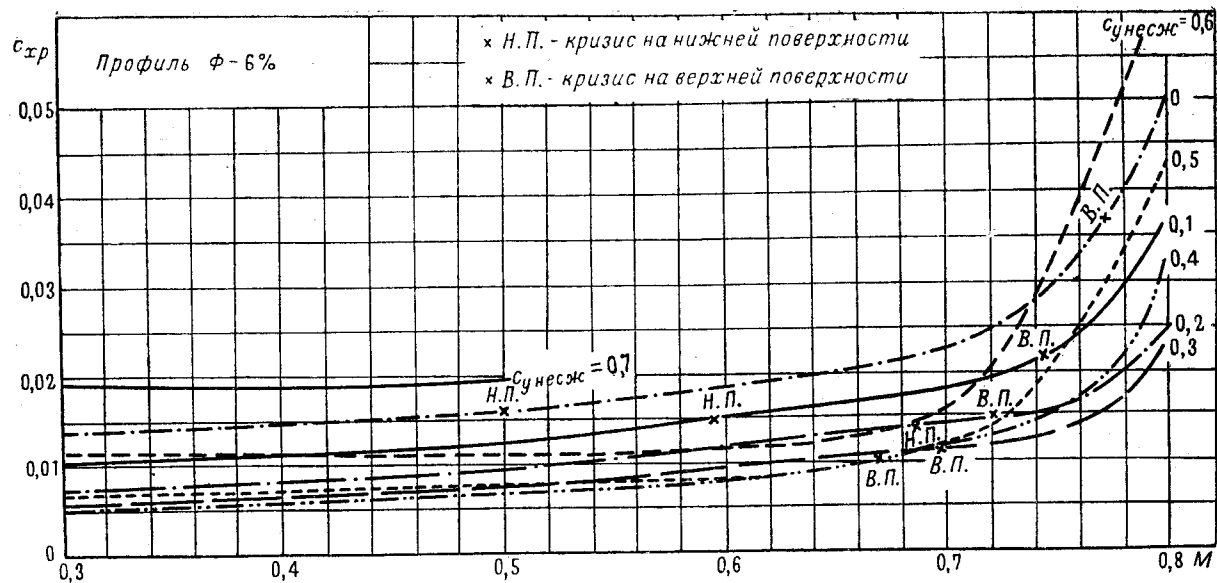
Таблица 16

Профиль ЦАГИ ВС-8; $\alpha_r = 5^\circ,6$

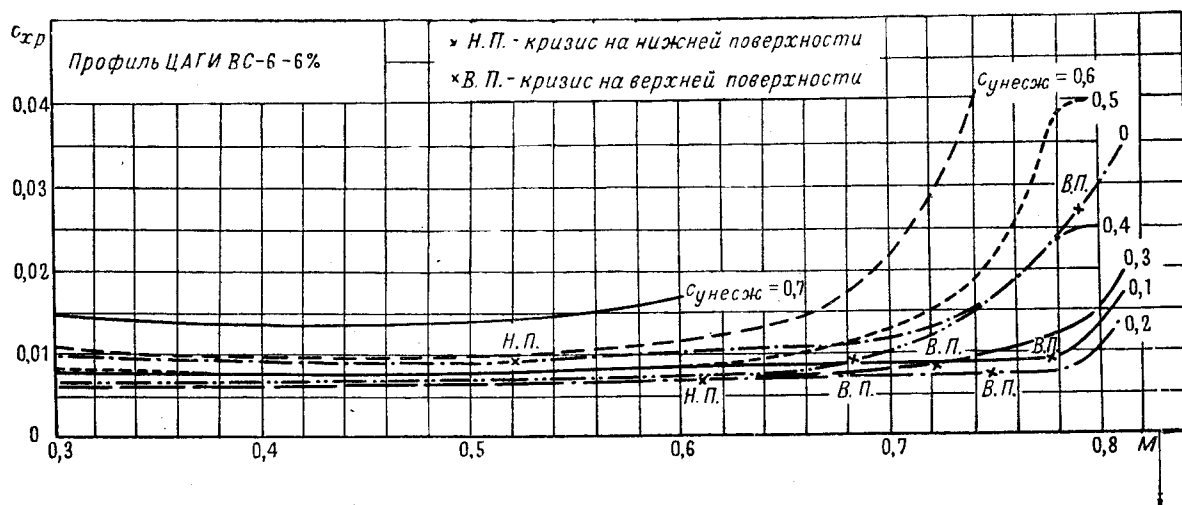
М	c_y	c_x	α	c_{xp}	α_∞
0,305	0,715	0,0434	$6^\circ,04$	0,0096	$3^\circ,05$
0,356	0,728	0,0437	$6^\circ,04$	0,0087	$3^\circ,00$
0,407	0,740	0,0442	$6^\circ,05$	0,0082	$2^\circ,96$
0,458	0,758	0,0453	$6^\circ,06$	0,0075	$2^\circ,91$
0,510	0,778	0,0471	$6^\circ,07$	0,0073	$2^\circ,84$
0,563	0,794	0,0488	$6^\circ,08$	0,0074	$2^\circ,80$
0,618	0,823	0,0542	$6^\circ,10$	0,0098	$2^\circ,71$
0,641	0,841	0,0584	$6^\circ,11$	0,0122	$2^\circ,66$
0,665	0,873	0,0652	$6^\circ,13$	0,0154	$2^\circ,57$
0,691	0,914	0,0749	$6^\circ,16$	0,0204	$2^\circ,44$
0,718	0,958	0,0884	$6^\circ,18$	0,0288	$2^\circ,31$
0,750	0,980	0,1059	$6^\circ,20$	0,0434	$2^\circ,24$
0,780	0,943	0,1190	$6^\circ,18$	0,0600	$2^\circ,42$
0,796	0,907	—	$6^\circ,15$	—	$2^\circ,46$

Материал скоростных испытаний в дальнейшем обрабатывался следующим образом. Строились графики $c_y(\alpha_\infty)$ и $c_{xp}(\alpha_\infty)$ для постоянных значений числа Маха М; по этим графикам определялись значения коэффициентов подъемной силы c_y и профильного сопротивления c_{xp} при различных значениях М, но при постоянных углах атаки α_∞ , соответствующих c_y несж = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7. Графики $c_y(M)$ и $c_{xp}(M)$ при $\alpha_\infty = \text{const}$ даны на фиг. 13—18.

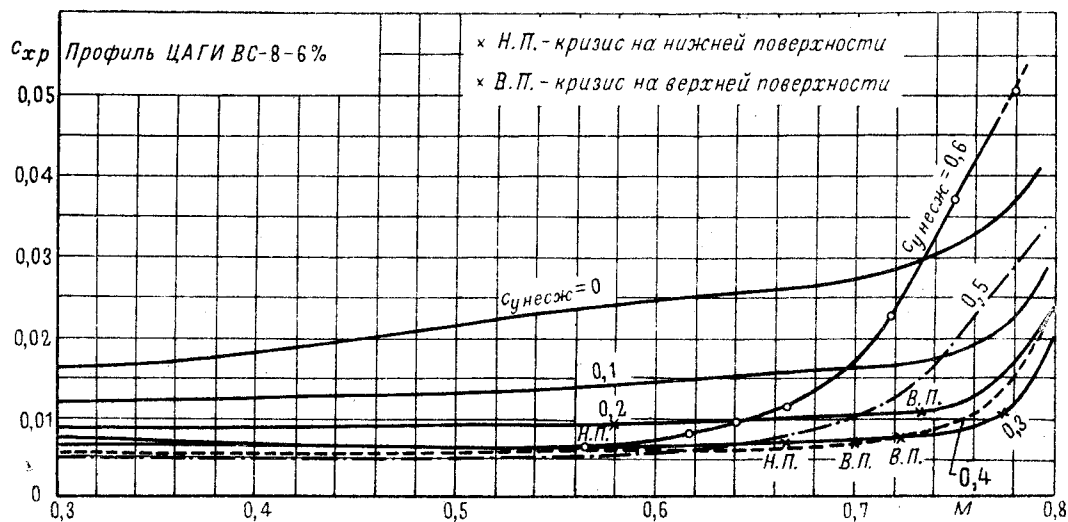
По данным табл. 2—16 построены поляры (фиг. 19—22), а по полярам — графики качества $k = c_y/c_{xp}$ в зависимости от числа Маха и c_y (см. фиг. 23—25) и максимального качества k_{max} от числа Маха (фиг. 26).



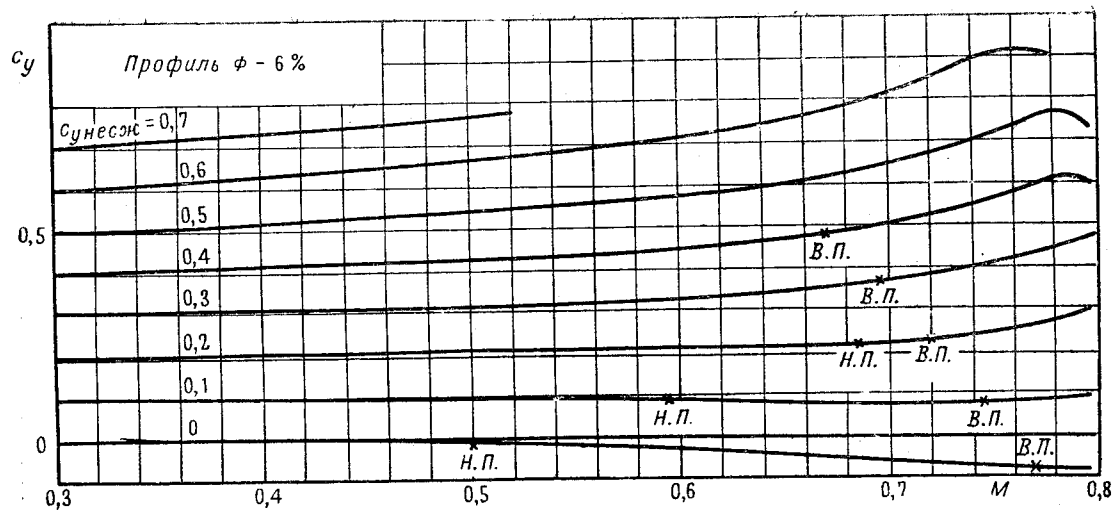
Фиг. 13



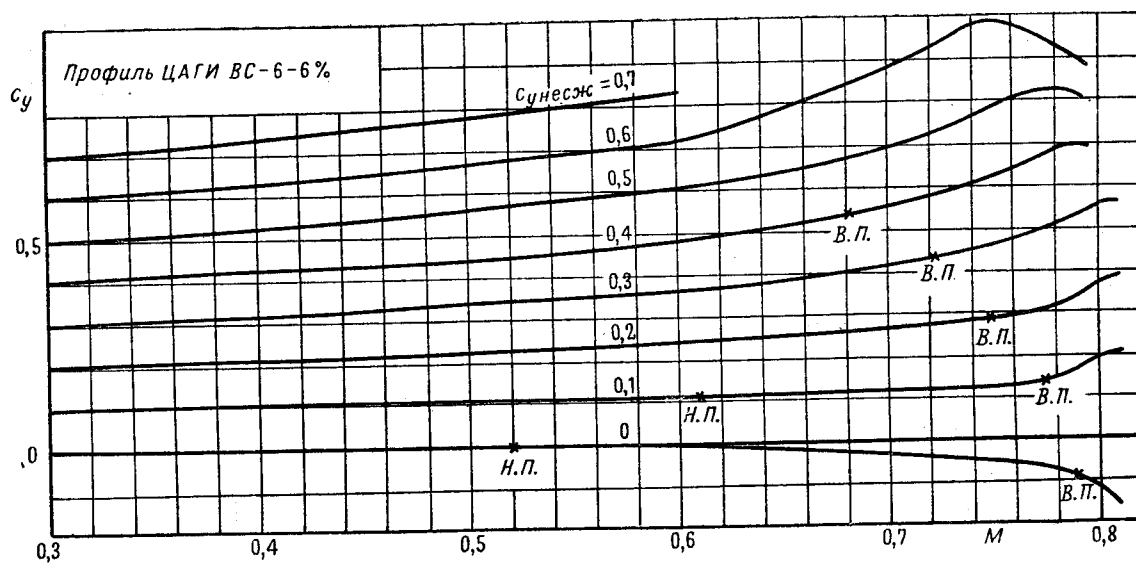
Фиг. 14



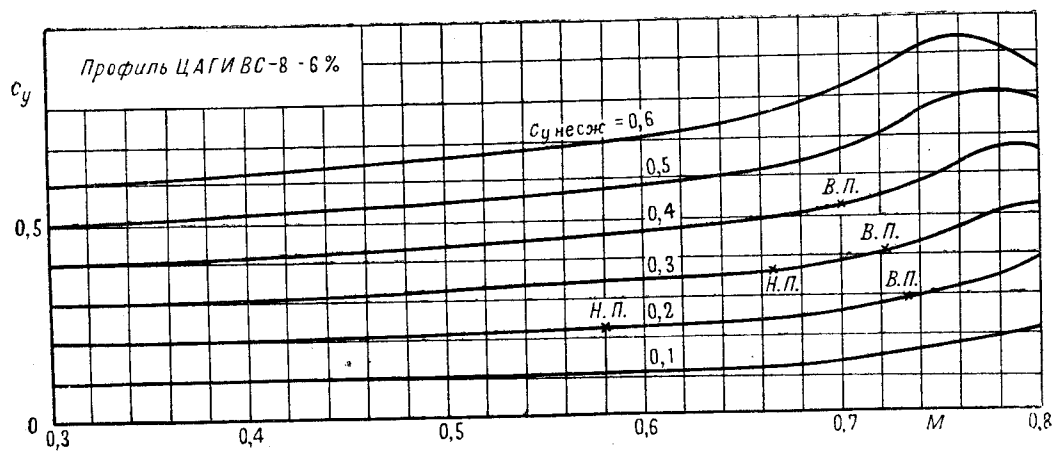
Фиг. 15



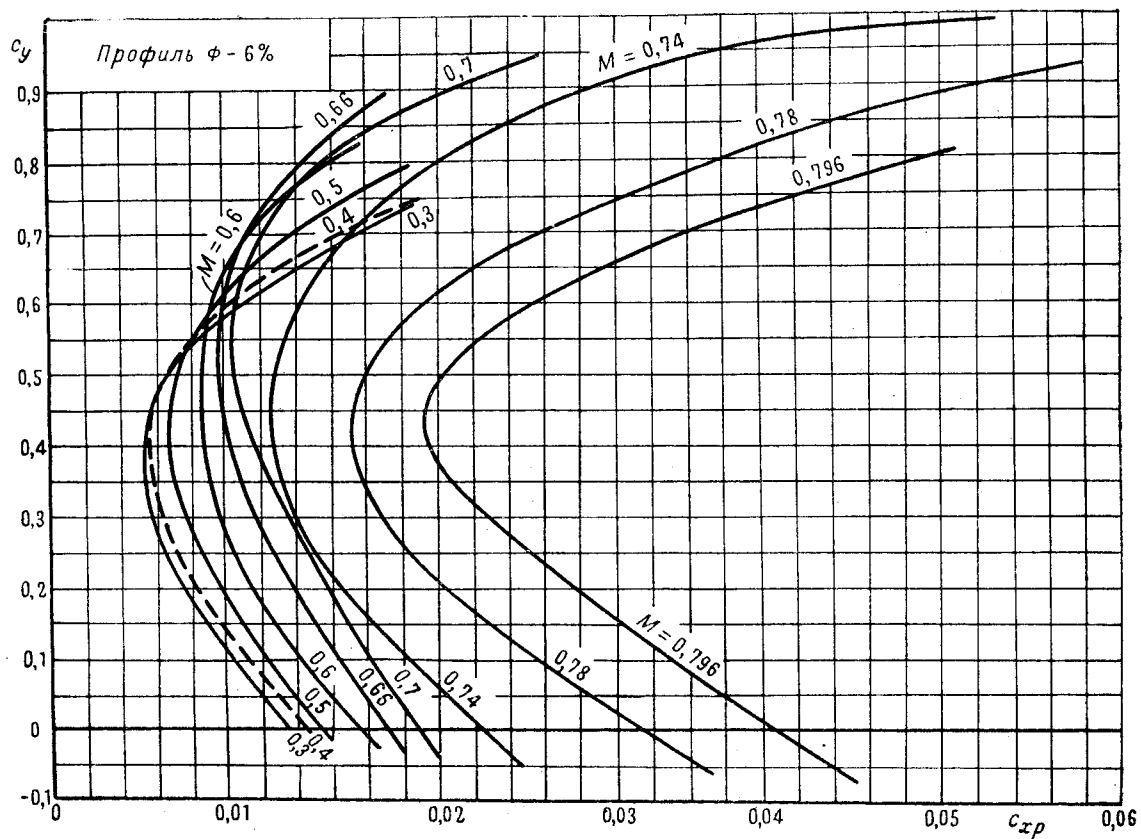
Фиг. 16



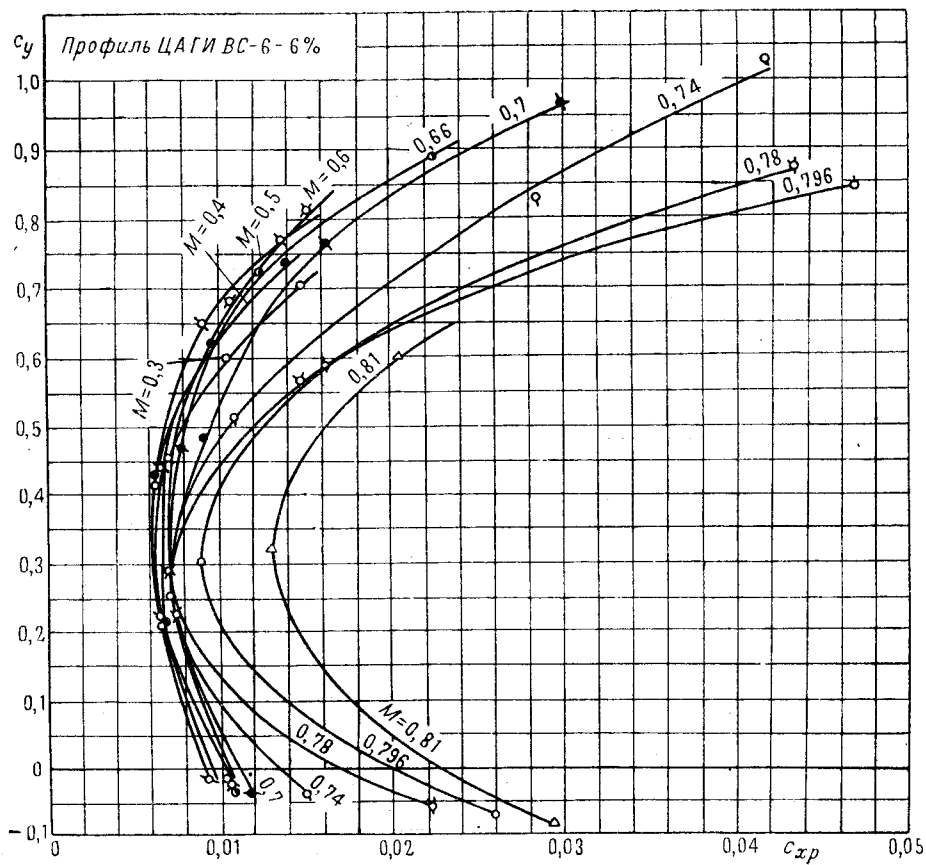
Фиг. 17



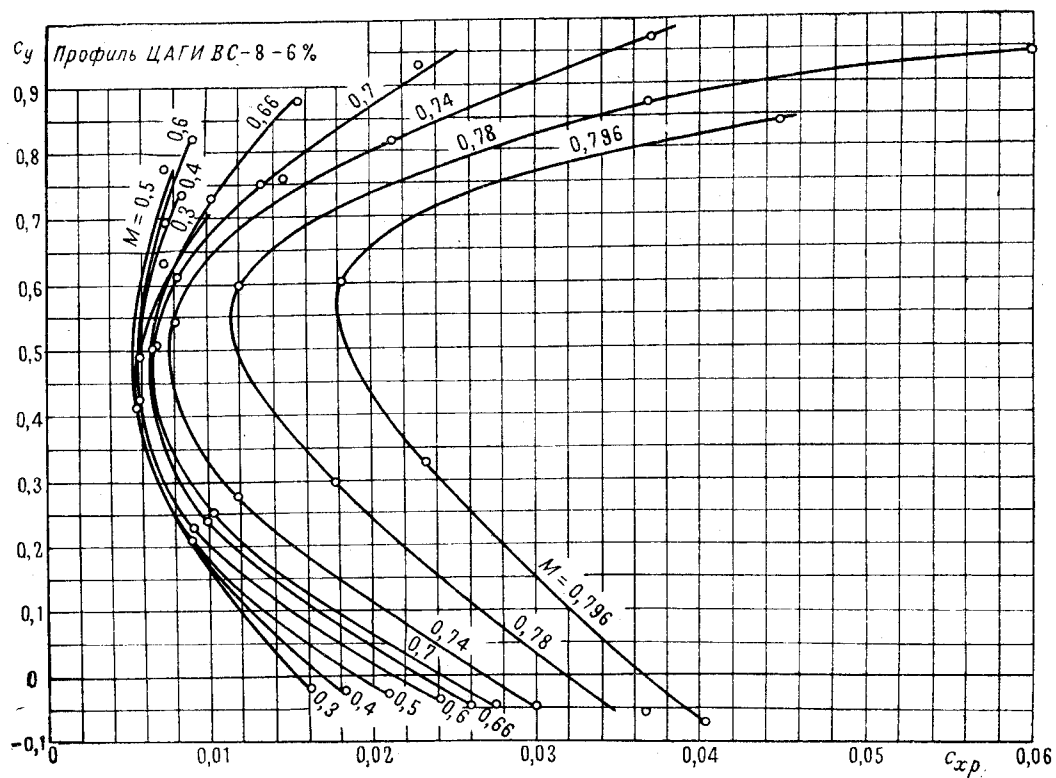
Фиг. 18



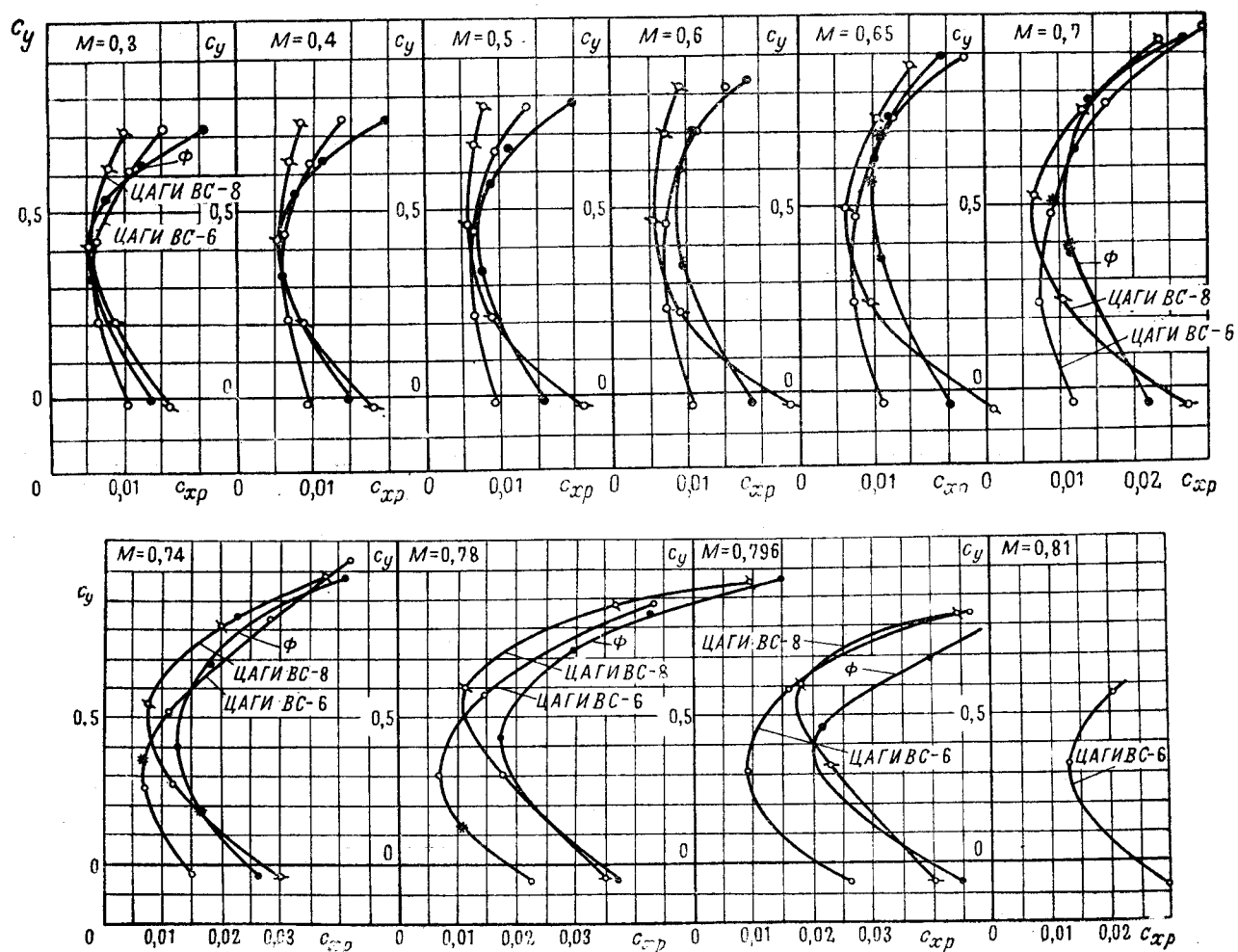
Фиг. 19



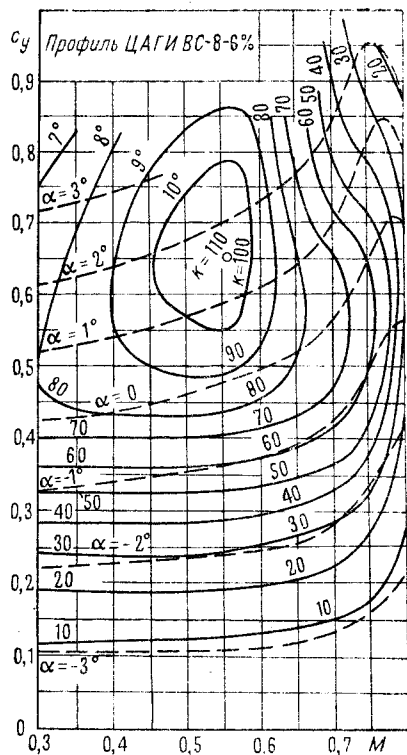
Фиг. 20



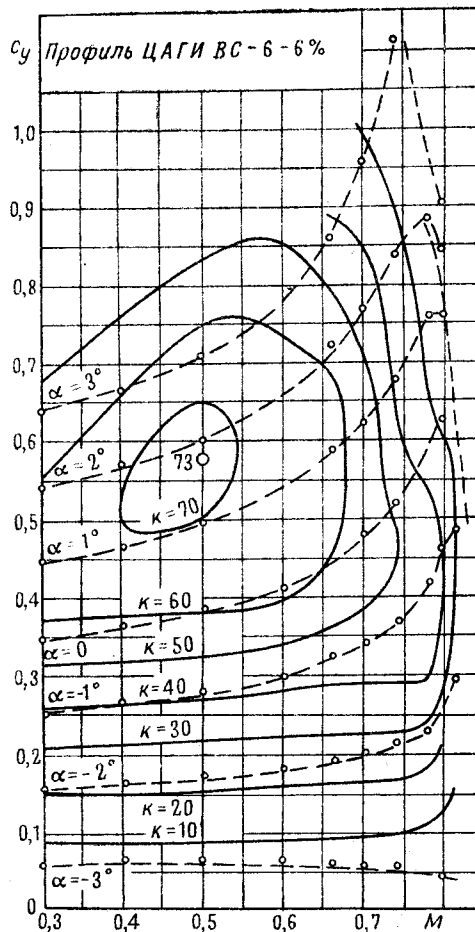
Фиг. 21



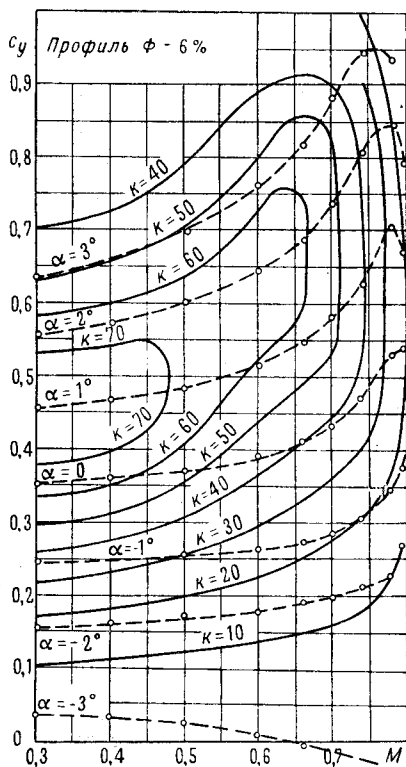
Фиг. 22



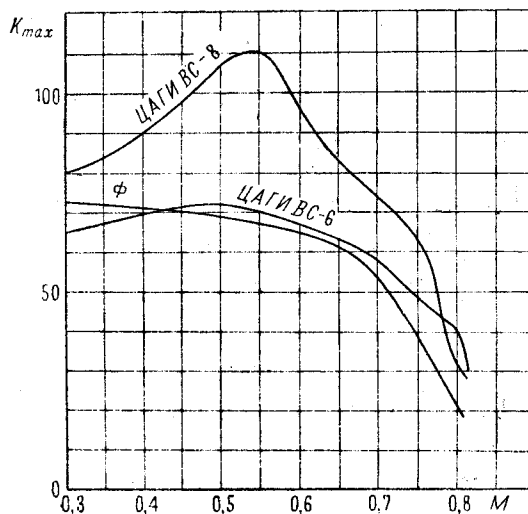
Фиг. 23



Фиг. 24



Фиг. 25



Фиг. 26

§ 3. ИЗМЕНЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С ЧИСЛОМ МАХА. СРАВНЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ

Результаты испытаний при малой скорости (80 м/сек) приведены на фиг. 12 в виде кривых $c_y(\alpha)$. Наклон кривых при $\lambda=5$ у всех профилей почти одинаков: $dc_y/d\alpha=3,7$, что при пересчете на $\lambda=\infty$ дает $dc_y/d\alpha_\infty=5,2$. Величина $c_{y\max}$ у профилей Ф и ЦАГИ ВС-8 близка к 1, а у профиля ЦАГИ ВС-6 несколько меньше, что объясняется его меньшей вогнутостью. Характер верхушки у всех профилей одинаков и достаточно плавный. Минимальное профильное сопротивление при $M=0,3$ (фиг. 19—21) составляет: $c_{xp\min}=0,0053$ у профиля Ф, $c_{xp\min}=0,0060$ у профиля ЦАГИ ВС-6 и $c_{xp\min}=0,0056$ у профиля ЦАГИ ВС-8.

Однако сравнение профилей при малых числах Маха может привести к неправильным выводам, так как аэродинамические характеристики с ростом числа Маха могут изменяться у профилей совсем по-разному.

Изменение c_y с изменением числа Маха при постоянном α_∞ можно проследить по фиг. 16—18. Коэффициенты подъемной силы быстро увеличиваются с ростом числа Маха не только до кризиса, но и значительно дальше. Особенно интенсивно идет рост c_y у профиля ЦАГИ ВС-6, слабее всего — у профиля Ф. Число Маха, при котором c_y достигает наибольшего значения, тем меньше, чем больше угол атаки. С увеличением числа Маха расстояния между кривыми $c_{y\text{ несж}} = \text{const}$ (или $\alpha_\infty = \text{const}$) увеличиваются, а $dc_y/d\alpha_\infty$ растет.

С увеличением числа Маха $c_{y\max}$ остается почти постоянным или слегка возрастает. Дополнительные испытания профиля Ф на больших углах атаки ($\alpha=13^\circ,5$ и $\alpha=16^\circ$) показали, что при больших числах Маха c_y достигает на этих углах примерно одинаковой наибольшей величины: $c_y=1,1 \div 1,15$.

При больших числах Маха ($M>0,75$) $c_{y\max}$ получается при углах атаки гораздо меньших, чем при малых скоростях; так, например, для профиля ЦАГИ ВС-6 при $M=0,75$ был получен $c_y=0,99$ уже при угле атаки $\alpha=2^\circ,6$.

Углы нулевой подъемной силы при больших числах Маха несколько увеличиваются.

Профильное сопротивление c_{xp} профилей ЦАГИ ВС-6 и ЦАГИ ВС-8 (фиг. 14—15) до наступления кризиса практически не возрастает; исключение составляет зона малых углов атаки для профиля ЦАГИ ВС-8.

У профиля Ф (фиг. 13) c_{xp} непрерывно растет, начиная с самых малых чисел Маха, когда о волновом кризисе не может быть и речи. Возможно, что причиной раннего роста сопротивления профиля Ф и профиля ЦАГИ ВС-8 на малых углах атаки является наличие пиков разрежения и больших градиентов давления на нижней поверхности вблизи носика у этих профилей.

Быстрое увеличение профильного сопротивления у профиля Ф наблюдается на числах Маха $M=0,67 \div 0,73$. У профиля ЦАГИ ВС-6 при $c_{y\text{ несж}}=0,1 \div 0,3$ (что соответствует $c_{y\text{ сж}}=0,15 \div 0,45$) кризис затянут до $M=0,75 \div 0,78$, на больших c_y он наступает раньше. У профиля ЦАГИ ВС-8, который был рассчитан для режимов больших c_y , кризис затянут до $M=0,72 \div 0,75$ при $c_{y\text{ несж}}=0,2 \div 0,4$ ($c_{y\text{ сж}}=0,3 \div 0,55$). На малых c_y , как и следовало ожидать по теоретическим расчетам распределения давления, c_{xp} велико. Для сравнения профилей между собой приведем табл. 17 приростов c_{xp} при переходе от $M=0,3$ к $M=0,8$.

Таблица 17

$c_{y\text{ несж}}$	Ф	ЦАГИ ВС-6	ЦАГИ ВС-8
0,1	0,0275	0,0050	0,0180
0,2	0,0175	0,0040	0,0140
0,3	0,0175	0,0090	0,0135
0,4	0,0300	0,0185	0,0170
0,5	0,0375	0,0315	0,0300

Минимальное профильное сопротивление, как видно из поляр фиг. 19—21, у профиля Ф непрерывно возрастает, начиная с малых чисел Маха. У профиля ЦАГИ ВС-6 заметный прирост начинается только с $M=0,78$, а у профиля ЦАГИ ВС-8 — с $M=0,72$. При $M=0,796$ значения $c_{xp\min}$ таковы:

Профиль	$c_{xp\min}$
Ф	0,0212
ЦАГИ ВС-6	0,0089
ЦАГИ ВС-8	0,0179

Для винтовых профилей важное значение имеет качество $k = c_y/c_{xp}$. Графики k (c_y , M) приведены на фиг. 23—25. У профилей ЦАГИ ВС-6 и ЦАГИ ВС-8 качество с увеличением числа Маха сперва возрастает из-за увеличения c_y при неизменных значениях c_{xp} , доходя до максимума при $M = 0,5 \div 0,55$; при дальнейшем увеличении M , вследствие появления волновых потерь, качество резко падает. Это хорошо видно на фиг. 26. У профиля Ф картина этого явления несколько иная вследствие раннего роста сопротивления по числу Маха. При изменении c_y качество от нуля при $c_y = 0$ доходит до максимального при $c_y = 0,6 \div 0,65$ и далее падает вследствие ухудшения обтекания профилей при больших углах атаки.

Профиль Ф по качеству k значительно уступает профилям ЦАГИ ВС-6 и ЦАГИ ВС-8.

Сравнение профилей между собой лучше всего провести по полярам фиг. 22. Профиль Ф на всех числах Маха значительно уступает профилю ЦАГИ ВС-6 при малых c_y и профилю ЦАГИ ВС-8 при больших c_y . Профиль ЦАГИ ВС-6 имеет вогнутость $\bar{f} = 0,0198$, профиль ЦАГИ ВС-8 имеет $\bar{f} = 0,0255$; естественно поэтому, что на $c_y = 0,4 \div 0,5$ профиль ЦАГИ ВС-6 лучше, чем профиль ЦАГИ ВС-8, а на $c_y > 0,4 \div 0,5$ — наоборот. По мере увеличения числа Маха, согласно теории Прандтля, кривизна профиля как бы увеличивается, поэтому значение c_y , на котором оба профиля имеют одинаковое сопротивление, с числом Маха растет.

§ 4. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ ПРОФИЛЕЙ С $\bar{c} = 0,06$ НА СЛУЧАИ ПРОФИЛЕЙ ДРУГОЙ ТОЛЩИНЫ

Если профили развить в серии, увеличивая или уменьшая пропорционально все ординаты, то эпюры давлений при значениях c_y , пропорциональных толщинам, будут примерно сохранить свой характер. Поэтому, если удалось затянуть возникновение волнового кризиса на профилях $\bar{c} = 0,06$, то кризис будет затянут и на других толщинах, близких к этой, при соответственных c_y .

Расчеты по $M_{кр}$ профилей с $\bar{c} = 0,04$ и $\bar{c} = 0,08$ показывают, что если $M_{кр}$ построить не по c_y , а по c_y/\bar{c} , то кривые получаются почти одинаковыми, но смещенными по вертикали. Переход от $\bar{c} = 0,06$ к $\bar{c} = 0,04$ дает при этом увеличение $M_{кр}$ на 0,05, а переход к $\bar{c} = 0,08$ — уменьшение на 0,045. Исходя из этих соображений, можно примерно предсказать поведение профилей с относительными толщинами, немного отличающимися от нашей исходной толщины $\bar{c} = 0,06$.

Подрастание c_y по M будет идти, как на фиг. 16—18, но максимальные значения c_y сдвинутся по M на профиле с $\bar{c} = 0,04$ вправо на 0,05, а на профиле с $\bar{c} = 0,08$ влево на 0,045.

Кривые сопротивления c_{xp} (M) в области, близкой к $c_{xp \min}$, надо перестроить, сдвинув их соответственно по M вправо или влево и перенумеровать c_y не так, чтобы c_y/\bar{c} были одинаковы. При этом вследствие влияния относительной толщины коэффициент профильного сопротивления c_{xp} у четырехпроцентных профилей может еще несколько понизиться, а у восьмипроцентных — несколько повыситься.

Все углы атаки надо пересчитать так, чтобы отношение α/\bar{c} было одинаково.

ВЫВОДЫ

В результате проектирования винтовых профилей и испытания их в Т-106 удалось получить новые профили ЦАГИ ВС-6 и ЦАГИ ВС-8, имеющие профильное сопротивление при больших скоростях значительно меньшее, чем у профиля Ф, считавшегося до сих пор наилучшим.

Применение этих новых профилей вместо профиля Ф на винтах современных истребителей может дать прирост максимальной скорости порядка 10 км/час.

На винтах в сечениях с относительной толщиной $\bar{c} = 0,06$ при $c_y \leq 0,5$ на режиме V_{\max} рекомендуется применять профиль ЦАГИ ВС-6. Для режимов $c_y > 0,5$ выгоднее применять профиль ЦАГИ ВС-8.

В сечениях с $\bar{c} = 0,04$ до $c_y = 0,35$ можно применять профиль серии ЦАГИ ВС-6, а при $c_y > 0,35$ — профиль серии ЦАГИ ВС-8.

В сечениях с $\bar{c} = 0,08$ граница применения профилей ЦАГИ ВС-6 и ЦАГИ ВС-8 лежит на режиме $c_y = 0,65$.

Положенное в основу проектирования новых профилей соображение о том, что профили с более высокими $M_{кр}$ должны иметь меньшее сопротивление при больших скоростях, вполне подтвердилось испытаниями в аэродинамической трубе Т-106.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. М. Серебрянский, С. А. Христианович. О волновом сопротивлении. Труды ЦАГИ № 550
2. В. С. Полядский. Влияние сжимаемости на аэродинамические характеристики профиля крыла. Технический отчет ЦАГИ № 21.
3. Р. Н. Алексеева, М. В. Рыжкова. Сравнение винтовых профилей по распределению давления в несжимаемой жидкости. (Не опубликовано).
4. Я. М. Серебрянский. Обтекание крыловых профилей произвольной формы. Труды ЦАГИ № 553
5. Д. В. Халезов. Влияние сжимаемости воздуха на характеристики винтов. (Не опубликовано, секретно).
6. Я. М. Серебрянский. Влияние параметров профиля на распределение давления. (Не опубликовано).
7. Л. А. Симонов. Профили в потоке несжимаемой жидкости. (Не опубликовано).
8. В. Г. Гальперин, И. П. Горский, А. П. Ковалев, С. А. Христианович. Исследование аэродинамических характеристик крыловых профилей в скоростной аэродинамической трубе ЦАГИ Т-106.

131940с