

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАБОТОСПОСОБНОСТИ
НЕПОСРЕДСТВЕННОГО РЕАКТИВНОГО ПРИВОДА ВОЗДУШНОГО ВИНТА.
(Gluk Конвертоплан. Ответ #255 - 08.04.11 :: 05:01:05)**

Часть четвертая.

При решении задачи по методикам, изложенным в части второй, было принято одно важное и существенное допущение при определении скорости истечения газа из сопла РП, а именно – расширение газа в соплах РП происходит полное: потенциальная энергия газа (полного давления) полностью превращается в кинетическую энергию истечения газа (статическое давление на срезе сопла устанавливается равным давлению окружающей среды $P_5 = P_0$). Данное допущение справедливо при докритическом перепаде давления газа в обычном суживающемся реактивном сопле или при сверхкритическом перепаде с использованием сопла Лаваля, позволяющего достичь сверхзвуковых скоростей истечения газа.

Поэтому, при выполнении теплового расчета любого ВРД, необходимо выполнять определение характера перепада давления в сопле РП:

$$\text{ПИ}_c = P_4^* / P_5 = P_4^* / P_0 < \text{ПИ}_{кр} \quad (10)$$

Примечание: В термодинамике и газодинамике принято оперировать отношением давлений $\beta = P_0 / P_4^*$, т.е. параметром, обратным значению ПИ_c : $\beta = 1 / \text{ПИ}_c$. Установлено, что при уменьшении отношения давлений до некоторой величины $\beta = \beta_{кр}$ в минимальном сечении («горле») сопла устанавливается постоянный **критический** перепад давления независимо от уменьшающегося давления окружающей среды или роста давления перед соплом. Величина критического отношения давлений зависит **только от природы рабочего тела (газа)** и её значение может быть определено по формуле

$$\beta_{кр} = [2 / (\kappa + 1)]^{1/(\kappa - 1)}$$

где $\kappa = C_p / C_v$ – отношение теплоемкостей рабочего тела (при постоянном давлении и объеме соответственно). Для воздуха $\kappa_s = 1,4$; для газа $\kappa_s = 1,33$ и их значения - в предварительных расчетах – можно принимать постоянными.

При $1 \leq \text{ПИ}_c < \text{ПИ}_{кр}$ ($\beta_{кр} < \beta \leq 1$) имеет место докритический (дозвуковой) режим; при $\text{ПИ}_c = \text{ПИ}_{кр}$ ($\beta = \beta_{кр}$) – критический (звуковой); при $\text{ПИ}_c > \text{ПИ}_{кр}$ ($\beta < \beta_{кр}$) – сверхкритический (сверхзвуковой) истечения рабочего тела из сопла РП.

Анализ результатов расчета в табл.1 показывает, что в задаче мы имеем сверхкритический режим истечения рабочего тела (газа) из сопел РП. Далее рассматриваем только данный режим.

При критическом и сверхкритическом истечении рабочего тела в минимальном сечении («горле») сопла РП устанавливается скорость критическая потока, равная звуковой, которая определяется выражением

$$W_{кр} = (2\kappa * R T_3^* / (\kappa + 1))^{0,5} \quad (11)$$

Из (11) видно, что критическая скорость звука определяется только природой и температурой рабочего тела.

При известном расходе рабочего тела через одиночное сопло РП

$$M_{Г1} = M_B / Z_{с РП} \quad (12),$$

полным давлением и температуре газа на выходе из КС (перед соплом), можно определить площадь критического сечения (минимального, «горла») одиночного сопла РП по следующей формуле

$$F_{с кр} = M_{Г1} * (R_{рт} * T_3^*)^{0,5} / (\psi_{кр} * P_4^*) \quad (13)$$

где: $F_{с кр}$ – площадь критического сечения одиночного сопла РП, (м^2);

$R_{рт}$ – газовая постоянная рабочего тела (воздуха или газа), ($\text{Дж/кг} \cdot \text{град}$);

T_3^* - температура рабочего тела (воздуха или газа) на входе в сопло РП, (К);

$\psi_{кр}$ – коэффициент, зависящий от природы рабочего тела;

P_4^* - давление рабочего тела (воздуха или газа) на входе в сопло РП, (Па).

Соответствующие численные значения коэффициентов, характеризующих рабочее тело РП, величин критического отношения давлений $\beta_{кр}$ и $\Pi_{кр}$ для воздуха и газа приведены в таблице 2.

Табл.2

Наименование критического параметра	Обозначение	Величина критического параметра для рабочего тела	
		Воздух, $\kappa = 1,4$, $R_v = 287,1$	Газ, $\kappa = 1,33$, $R_r = 289,3$
Отношение давлений	$\beta_{кр}$	0,528282	0,540364
Степень расширения	$\Pi_{кр}$	1,892929	1,8506
Коэффициент	$\Psi_{кр}$	0,68473	0,67263
Формула (11) для критической скорости	$W_{кр} =$	$18,30 * (T_3^*)^{0,5}$	$18,17 * (T_3^*)^{0,5}$

Зная площадь критического сечения сопла $F_{с\ кр}$, можно найти диаметр минимального сечения («горла») сопла

$$D_{с1\ кр} = 2 * (F_{с\ кр} / \Pi_{кр})^{0,5} \quad (14)$$

Для полного превращения располагаемой энергии рабочего тела в его кинетическую энергию, Рп должно быть оборудовано соплом Лавалля, т.е. оно должно быть спроектировано и изготовлено с расширяющимся профилированным каналом, расположенным за критическим сечением. Это позволило бы разогнать рабочее тело до скорости C_5 по формуле (8) и получить на срезе сопла РП статическое давление газа, равное давлению окружающей среды **в заданных расчетных условиях**. Учитывая, что ЛА эксплуатируется в различных условиях (высота, скорость полета, разные климатические и погодные условия), то обеспечить расчетный режим работы сопла Лавалля с неизменяемой геометрией в этих условиях не удастся. Да и реализовать изготовление сопла Лавалля в любительских условиях более чем проблематично. Поэтому **будем считать, что рассматриваемый РП оборудован обычным суживающимся коническим (коноидальным) соплом**.

При таком допущении, в соплах РП будет реализована только часть располагаемого давления рабочего тела – на срезе сопла установится давление

$$P_5 = P_4^* / \Pi_{кр} > P_0 \quad (15),$$

т.е расширение рабочего тела в соплах РП будет не полным. В этом случае тягу РП необходимо определять по формуле (2), учитывая динамическую T_d и статическую $T_{ст}$ её составляющие.

Для вычисления величины динамической составляющей тяги T_d используем величину скорости истечения $C_5 = W_{кр}$ из формулы (11), расход рабочего тела $M_{г1}$ из (12), а для определения статической составляющей – величины $F_{с\ кр}$ и P_5 из формул (13) и (15) соответственно. Тяга T одиночного РП определится по формуле (2), а суммарная тяга T_{Σ} – умножением тяги T на число сопел (Z) РП.

Вычисление величин мощностей и их баланса по формуле (1) аналогично изложенному ранее.

Результаты вычислений параметров РП для случая неполного расширения рабочего тела в соплах РП приведены в таблице 3 (исходные данные соответствуют данным табл.1).

Табл.3

Параметр	Обозн.	Разм.	Жорж			Влад. Александр.	
Степ. расширения газа критическая	$\Pi_{кр}$		1,85	1,85	1,85	1,85	1,85
Располагаемая степень расширения газа	$\Pi_{ис\ расп}$		2,98	2,98	2,38	2,38	2,38
Выполнение условия $\Pi_{ис\ расп} > \Pi_{кр}$			Да	Да	Да	Да	Да
Давление газа перед соплом полное	P_4^*	Па	301994	301994	240647	240647	240647
Стат. давление на срезе сопла	$P_{5ср}$	Па	163187	163187	130037	130037	130037
Критическая скорость истечения газа	$A_{кр}$	м/с	564,71	650,78	721,34	625,94	721,34
	$\Pi_{СИкр}$		0,76784	0,76784	0,76784	0,76784	0,76784
Расход газа через одно сопло РП	$M_{г1}$		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Площадь критического сечения сопла	$F_{с\ кр}$	м ²	0,000570	0,000657	0,000913	0,000793	0,000913
Эквивалентный диаметр сопла	$D_{кр}$	мм	26,94	28,92	34,10	31,77	34,10
Динамическая тяга (1 РП)	$T_{дин1}$	Н	141,18	162,70	180,34	101,48	125,34
Статическая тяга (1 РП)	$T_{стат1}$	Н	35,25	40,62	26,23	22,76	26,23
Полная тяга (1 РП)	$T_{пол1}$	Н	176,43	203,32	206,56	124,24	151,56
Суммарная тяга РП (неполн. расширен.)	$T\ с\ нпр$	Н	1411,42	1626,55	1652,50	993,94	1212,50
Полная мощн. привода РП (неполн. рас.)	$N\ вв\ нпр$	кВт	310,51	357,84	363,55	218,67	266,75

Сравнение результатов вычислений, приведенных в таблицах 1 и 3, показывает, что РП с неполным расширением рабочего тела в соплах имеют меньшую величину тяги – примерно на 6% - и соответственно меньшую мощность привода (по сравнению с РП полного расширения). Добавка статической составляющей тяги не полностью компенсирует снижение динамической составляющей из-за снижения скорости истечения рабочего тела из сопл. Т.е. баланс мощности нарушен и $N_{РП\ нпр} < N_{ПК} + N_{КН} + N_{ВВ}$. При сохранении прочих исходных данных (по условиям задачи), возможен только один путь обеспечения баланса мощностей – увеличение динамической составляющей тяги РП за счет увеличения скорости истечения рабочего тела из сопл.

В нашем случае, согласно формуле (11), критическая скорость истечения рабочего тела из РП может быть увеличена **только за счет повышения температуры** T_4^* перед соплом (на выходе из КС).

Для этого вычисляется величина дефицита тяги одинарного РП $Def\ T$, которая прибавляется к величине динамической составляющей тяги $T_{дин1}$. Скорость $C_5 = W_{кр\ треб}$ при известной требуемой тяге $T_{дин1\ треб}$ при известном расходе $M_{Г1}$ находим из выражения

$$W_{кр\ треб} = T_{дин1\ треб} / M_{Г1} \text{ (м/с)}.$$

По величине скорости $W_{кр\ треб}$ находим требуемую температуру рабочего тела на выходе из КС

$$T_3^*_{\text{треб}} = W_{кр}^2 / (2\kappa * R / (\kappa + 1))^{0,5} \text{ (К)}$$

Результаты вычислений применительно к данной задаче приведены в таблице 4. В нижней строке приведены величины температуры рабочего тела, использованные при вычислениях в таблицах 1 и 3.

Табл.4

Параметр	Обозн.	Разм.	Жорж			Влад. Александр.	
Дефицит тяги ($T_{\text{табл.2}} - T_{\text{пол 1 табл.3}}$)	Def T	Н	9,96	11,48	8,24	7,15	8,24
Динамическая тяга (1 РП) требуемая	$T_{дин\ треб}$	Н	151,14	174,18	188,57	108,63	133,57
Критическая скорость истечения газа	$W_{кр\ треб}$	м/с	604,56	696,70	754,29	654,53	754,29
Температура газа в обеспечение $W_{кр2}$	$T_3^*_{\text{треб}}$	К	1106,68	1469,74	1722,75	1297,19	1722,75
Температура газа в обеспечение C_5	T_3^* (табл.1)	К	965,60	1282,38	1575,54	1186,34	1575,54

Из табл.4 видно, что получение величины тяги РП с неполным расширением рабочего тела в соплах равной величине тяги РП с полным расширением, требуется значительное увеличение температуры T_3^* рабочего тела на входе в сопла РП, которая может достичь предельно-допустимой.

Конец четвертой части.