

УДК 621.438.001 2 (02)

**В.А. Григорьев, В.М. Радько, Д.С. Калабухов**

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика  
С.П. Королева (национальный исследовательский университет),  
Российская Федерация*

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕМА И МАССЫ ТУРБИН СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ

*Разработана методика построения математических моделей объема и массы осевых (ОТСММ) и центробежных турбин сверхмалой мощности (ЦС ТСММ) с привлечением методов математической статистики. Проанализировано влияние основных режимных и геометрических параметров на массу турбин указанных типов, проведено сравнение массовых характеристик ОТСММ и ЦС ТСММ при различных значениях диаметральных габаритных параметров. Приведены обобщенные регрессионные математические модели массы, которые могут использоваться при решении задачи оптимизации параметров турбин сверхмалой мощности по системным показателям эффективности.*

**Ключевые слова:** турбина сверхмалой мощности, математическая модель, масса турбины, оптимизация параметров.

### Введение

Турбины сверхмалой мощности (ТСММ) наряду с входными и выходными устройствами входят в состав турбоприводов сверхмалой мощности [1]. Наиболее распространенными являются приводы с одноступенчатыми турбинами осевого и центробежного типов. С целью повышения эффективности турбоприводов необходимо решать задачу оптимизации основных режимных и геометрических параметров турбин [2] по нескольким критериям, одним из которых является масса турбопривода. В известной научно-технической литературе практически отсутствуют какие-либо сведения по математическим моделям массы таких агрегатов.

В данной работе поставлена задача построения математических моделей массы ТСММ. Причиной является многообразие вариантов конструктивного исполнения входных и выходных устройств с одной стороны и недостаточная изученность влияния параметров этих устройств на эффективность приводов с другой, что затрудняет формирование математических моделей турбоприводов в целом.

### Формирование математических моделей объема и массы турбин сверхмалой мощности

В работе [3] была показана необходимость построения моделей критериев оценки эффективности в зависимости от десяти безразмерных влияющих факторов – геометрических и режимных параметров ТСММ. Перечислим эти факторы:

$Y_T = 0,1 \dots 0,58$  – параметр нагруженности ТСММ;

$\pi_T = 1,0 \dots 0,56$  – степень понижения давления в турбине;

$\frac{h_{CA}}{D_{1(ср)}} = 0,01 \dots 0,05$  – относительная высота лопатки соплового аппарата (СА);

$\alpha_{1эф} = \begin{cases} 9,2 \dots 25^\circ & \text{для ЦС ТСММ} \\ 5 \dots 24^\circ & \text{для ОТСММ} \end{cases}$  – эффективный угол выхода потока из СА;

$\varepsilon = 0,1 \dots 1$  – степень парциальности;

$\bar{D} = 0,4 \dots 0,9$  – отношение выходного диаметра  $D_2$  рабочего колеса (РК) к его входному диаметру  $D_1$  в ЦС ТСММ;

$\bar{\delta}_{кр\text{СА}} = 0,14 \dots 0,42$  – относительная толщина выходной кромки лопатки СА в ОТСММ;

$\left(\frac{b}{t}\right)_{РК} = \begin{cases} 1,2 \dots 2,2 & \text{для ЦС ТСММ} \\ 1 \dots 1,7 & \text{для ОТСММ} \end{cases}$  – густота решетки РК;

$\beta_{2эф} = \begin{cases} 15 \dots 60^\circ & \text{для ЦС ТСММ} \\ 15 \dots 40^\circ & \text{для ОТСММ} \end{cases}$  – эффективный угол выхода потока из РК;

$\bar{F}_{РК} = 0,975 \dots 2,625$  – отношение площади канала на выходе из РК к площади на входе в РК ЦС ТСММ;

$\left(\frac{s}{h}\right)_{СА}$  – удлинение СА;

$$\bar{D}_M = \begin{cases} 0,4 \dots 1,6 & \text{для ЦС ТСММ} \\ 0,4 \dots 2 & \text{для ОТСММ} \end{cases} \quad \text{— фактор масштаба,}$$

учитывающий влияние отклонения величины диаметра  $D_{1(ср)}$  ступени от величины диаметра испытуемой ступени турбины  $D_{1(ср)исп} = 50 \text{ мм}$  на ее эффективность.

Индекс «ср» относится к среднему диаметру ступени ОТСММ.

На начальном этапе проектирования можно сформировать эскизный облик одноступенчатой турбины, близкий к конструктивному.

На рис. 1 для турбин осевого и центробежного типов представлен такой схематический облик. Пунктирными линиями показаны контуры корпуса соплового аппарата, не учитываемые при формировании математической

модели ввиду многообразия вариантов конструктивного исполнения.

Математическая модель массы одноступенчатой турбины базируется на предварительном определении ее объема.

Объем турбины складывается из следующих составляющих

$$V_T = V_{лСА} + V_{\varepsilon СА} + V_{лРК} + V_{корСА} + V_{лРК} + V_{бандРК}, \quad (1)$$

где  $V_{лСА}$  — объем лопаток СА;  $V_{\varepsilon СА}$  — объем непроходной части СА парциальной турбины;

$V_{лРК}$  — объем лопаток РК;

$V_{корСА}$  — объем корпуса СА;

$V_{лРК}$  — объем дисковой части РК без учета рабочих лопаток;

$V_{бандРК}$  — объем бандажного кольца РК.

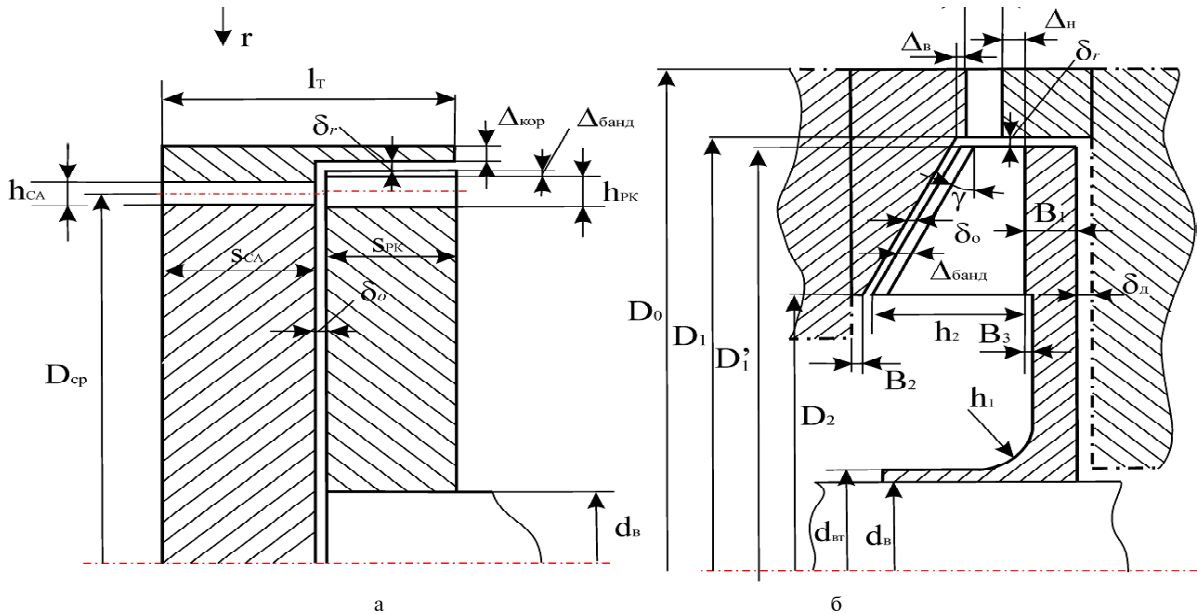


Рис. 1. Схема одноступенчатой ТСММ: а — осевого типа; б — центробежного типа

Объем лопаток СА для турбин обоих типов

$$V_{лСА} = z_{лСА} F_{лСА} h_{СА} = z_{лСА} F_{лСА} \frac{h_{СА}}{D_{1(ср)}} D_{1(ср)исп} \bar{D}_M, \quad (2)$$

где  $z_{лСА}$  — число лопаток СА;  $F_{лСА}$  — площадь профиля лопатки СА;  $h_{СА}$  — высота лопатки СА.

Объем непроходной для потока части СА ОТСММ и ЦС ТСММ соответственно

$$V_{\varepsilon СА О} = \pi D_{ср} s_{СА} (1 - \varepsilon) = \pi D_{ср}^2 \bar{D}_M^2 \left( \frac{s}{h} \right)_{СА} \frac{h_{СА}}{D_{ср}} \times (1 - \varepsilon); \quad (3)$$

$$V_{\varepsilon СА ЦС} = \pi \left( \frac{D_0^2 - D_1^2}{4} \right) (1 - \varepsilon) h_{СА}, \quad (4)$$

где  $s_{СА}$  — ширина решетки лопаточного венца СА. Объем лопаток РК

$$V_{лРК О} = z_{лРК} F_{лРК} h_{РК} = z_{лРК} F_{лРК} h_{СА} (1 + \bar{\Delta}_n + \bar{\Delta}_b); \quad (5)$$

$$V_{лРК ЦС} = z_{лРК} F_{лРК} \frac{h_1 + h_2}{2} = z_{лРК} F_{лРК} \frac{h_{СА}}{D_1} D_{1исп} \times \bar{D}_M (1 + \bar{\Delta}_n + \bar{\Delta}_b) \left( 0,5 + \frac{\bar{F}_{РК}}{2\bar{D}} \right), \quad (6)$$

где  $z_{лРК}$  — число лопаток РК;  $F_{лРК}$  — площадь профиля лопатки РК;  $h_{РК}$  — высота лопатки РК ОТСММ;

$h_1 = \frac{h_{CA}}{D_1} D_{1исп} \bar{D}_M (1 + \bar{\Delta}_H + \bar{\Delta}_B)$  – высота лопатки РК ЦС ТСММ на входе;

$h_2 = h_1 \frac{\bar{F}_{РК}}{\bar{D}}$  – высота лопатки РК ЦС ТСММ на выходе;

$\bar{\Delta}_H$  и  $\bar{\Delta}_B$  – относительная величина нижней и верхней перекрыш.

Объем корпуса СА ОТСММ

$$V_{корСА О} = \pi(D_{cp} + 2h_{РК} + \delta_r + \Delta_B + \Delta_{банд}) \times (\delta_r + \Delta_B + \Delta_{банд}) + \pi(D_{cp} + 2h_{РК} + 2\delta_r + 2\Delta_B + 2\Delta_{банд} + \Delta_{кор}) \times \Delta_{кор} l_T + \pi \left( \frac{D_{cp} - 2h_{CA}}{4} \right)^2 \times \Delta_{кор} l_T + \pi \left( \frac{D_{cp} - 2h_{CA}}{4} \right)^2, \quad (7)$$

где  $\delta_r = 0,3...0,8$  мм – радиальный зазор [5];

$\Delta_{кор} = (0,5...1)h_{CA}$  – толщина стенки корпуса СА;

$l_T = s_{CA} + \delta_o + s_{РК}$  – длина турбины;

$\delta_o = (0,16...0,48) h_{CA}$  – осевой зазор между венцами СА и РК [5];

$s_{РК} = (3,5...5,5) h_{РК}$  – ширина решетки лопаточного венца РК [5];

$\Delta_{банд} = 0,1...0,5$  мм – толщина бандажного кольца [5].

Объем корпуса СА ЦС ТСММ

$$V_{корСА ЦС} = \pi \left( \frac{D_0^2 - D_1'^2}{4} \right) (\delta_d + \delta_o + \Delta_{банд} + h_2 - h_1 + B_1 + B_2 + \Delta_H + \Delta_B) + \pi \left( \frac{D_1'^2 - D_2^2}{4} \right) \left( \frac{2B_2 + h_2 - h_1 + \delta_r \operatorname{tg} \gamma}{2} \right), \quad (8)$$

где  $D_1' = D_1(1 + 2\bar{\delta}_r)$  – диаметр на выходе из СА;

$D_0 = 4 \left( \frac{b}{t} \right)_{CA} a_{rCA} + D_1'$  – диаметр на входе в СА;

$\left( \frac{b}{t} \right)_{CA} = 1,2$  – густота решетки СА [4];

$a_{rCA} = 0,036D_1$  – минимальное сечение канала СА в радиальной плоскости [4];

$\bar{\delta}_r = 0,01$  – относительный радиальный зазор [4];

$\delta_0 = (0,125...0,675) \frac{h_{CA}}{D_1} D_{1исп} \bar{D}_M$  [4];

$\delta_d = \delta_0$  – зазор между диском РК и корпусом СА;

$\Delta_{банд} = (0,5...0,6)h_1$  – толщина бандажного кольца РК;

$B_1 = (0,1...0,15)D_1 - h_1$  – ширина обода диска [4].

Объем диска РК

$$V_{дРК О} = \pi \left( \frac{(D_{cp} - h_{CA} - 2\Delta_H)^2 - d_b^2}{4} \right) s_{РК}; \quad (9)$$

$$V_{дРК ЦС} = \pi \left( \frac{D_1^2 - D_2^2}{4} \right) B_1 + \pi \left( \frac{D_2^2 - D_3^2}{4} \right) (B_1 - B_3) + \pi \left( \frac{D_3 + d_{вт}}{2} \right) \left[ (h_1 + B_1 - B_3) \frac{D_3 - d_{вт}}{2} + \frac{\pi h_1^2}{4} \right] + \pi (h_2 + B_1) \left( \frac{d_{вт}^2 - d_b^2}{2} \right), \quad (10)$$

где  $B_3 = 0,006D_1$  – величина подрезки диска на выходе потока из РК [6];

$d_b = 0,2D_1$  – диаметр вала турбины [4];

$d_{вт} = 0,24D_1$  – диаметр втулки диска [4];

$D_3 = d_{вт} + 2h_1$ .

Объем диска ЦС ТСММ складывается из объема цилиндрической части обода диска и объема втулки диска РК.

Объем бандажа РК

$$V_{бандРК О} = \pi(D_{cp} + h_{РК} + 2\Delta_B + \Delta_{банд}) \times \Delta_{банд} s_{РК}; \quad (11)$$

$$V_{бандРК ЦС} = \pi \Delta_{банд} \left( \frac{D_1^2 - D_2^2}{4} \right). \quad (12)$$

Лопаточные венцы ТСММ, как правило, целиком выполняют из одного материала с плотностью  $\rho$ , поэтому масса турбины  $M_T = \rho V_T$ .

Значения одной части исходных данных представленной аналитической модели задаются проектировщиком из указанных выше диапазонов значений. Большинство из них определяется че-

рез факторы  $\bar{D}_M$  и  $\frac{h_{CA}}{D_{1(ср)}}$ . Другая часть исходных

данных – площади лопаток  $F_{лCA}$  и  $F_{лPK}$  – зависят от нескольких влияющих факторов. Из-за сложности определения величин образующих кривых лопаток в зависимости от основных параметров ТСММ и невозможности применения единого метода построения профилей лопаток РК, выражения для  $F_{лCA}$  и  $F_{лPK}$  были получены не аналитическим путем, а с помощью регрессионного статистического анализа данных по площадям профилей лопаток, построенных для 85 комбинаций варьируемых параметров по планам экспериментов [3].

$$F_{лCA O} = f(\pi_r, h_{CA}/D_{ср}, \alpha_{1эф}, \bar{\delta}_{кр CA}, (b/t)_{PK}, (s/h)_{CA}, \bar{D}_M); \quad (13)$$

$$F_{лCA ЦС} = f(\alpha_{1эф}, \varepsilon, \bar{\delta}_{кр CA}, \bar{D}_M); \quad (14)$$

$$F_{лPK O} = f(h_{CA}/D_{ср}, \varepsilon, (b/t)_{PK}, \beta_{2эф}, \bar{D}_M); \quad (15)$$

$$F_{лPK ЦС} = f(Y_r, \pi_r, \alpha_{1эф}, \bar{D}, (b/t)_{PK}, \beta_{2эф}, \bar{D}_M). \quad (16)$$

Наличие в выражении (13) фактора  $(b/t)_{PK}$  объясняется его взаимосвязью с  $(b/t)_{CA}$  [4], а влияние  $\varepsilon$  и  $h_{CA}/D_{ср}$  на  $F_{лPK O}$  обусловлено их совместным воздействием на величины  $h_{PK}$  и  $s_{PK}$ . Режимные параметры влияют на площади лопаток СА ОТСММ и РК ЦС ТСММ. В первом случае с изменением  $\pi_r$  меняется форма сверхзвукового профиля, во втором – конструктивный угол наклона входной кромки рабочей лопатки за счет сохранения постоянным угла атаки набегающего потока  $i_{PK} = 0$ . При профилировании рабочих лопаток ОТСММ было принято условие независимости величины угла  $\beta_{1K}$  от  $i_{PK}$  с целью обеспечения равенства  $\beta_{1K} = \beta_{2K}$ , соответствующего активной турбине, поэтому на  $F_{лPK O}$  режимные параметры не влияют. На рис. 2 показаны варианты характерных профилей лопаточных венцов турбин обоих типов. Такие параметры, как  $\omega_{1CA(PK)}$ ,  $\omega_{2CA(PK)}$ ,  $\gamma_{устCA}$  и др. задавались при профилировании из допустимых диапазонов их значений, указанных, например, в [6].

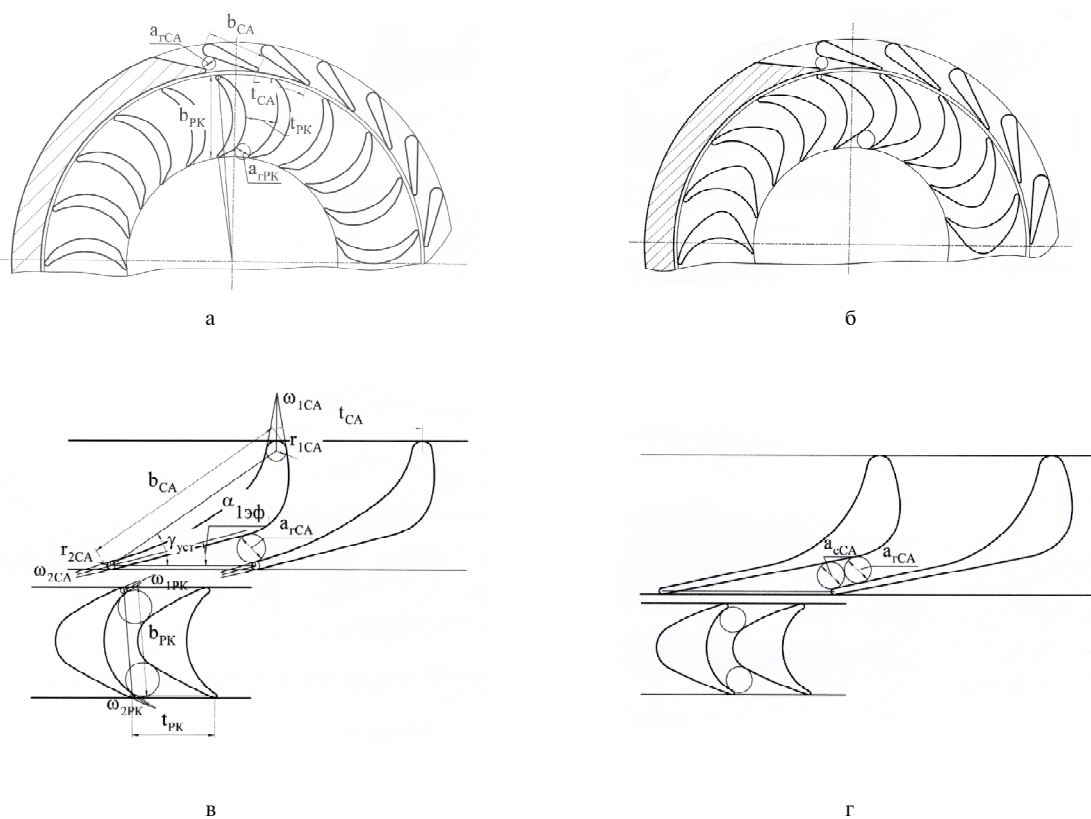


Рис. 2. Варианты профилей лопаточных венцов:  
 а, б – центробежного типа; в – осевого типа (дозвуковое истечение из СА);  
 г – осевого типа (сверхзвуковое истечение из СА)

**Анализ влияния режимных и геометрических параметров на массу турбин сверхмалой мощности**

При проведении анализа влияния геометрических и режимных параметров на массу ОТСММ и ЦС ТСММ, детали которой выполнены из материала Д-16Т с плотностью  $\rho = 2800 \text{ кг/м}^3$ , была использована сформированная выше математическая модель. В ходе анализа выявлено, что увеличение параметров  $h_{CA}/D_{cp}$ ,  $\varepsilon$ ,  $\bar{\delta}_{рк}$ ,  $(b/t)_{рк}$ ,  $(s/h)_{CA}$ ,  $\bar{D}_M$  в осевых турбинах приводит к уменьшению  $M_T$ , а в центростремительных турбинах увеличению  $M_T$  способствует рост  $\bar{D}_M$ ,  $\bar{D}$ ,  $\bar{F}_{рк}$ ,  $(b/t)_{рк}$ . Увеличение  $\alpha_{1эф}$  и  $\beta_{2эф}$  для двух типов турбин приводит к малозначительному уменьшению  $M_T$ . Режимные параметры  $Y_T$  и  $\pi_T$  на величину массы ОТСММ практически не влияют, а на массу ЦС ТСММ  $\pi_T$  оказывает существенное воздействие, т.к. от величины  $\pi_T$  зависит величина перекрыш, а, значит, и высота лопатки на входе в РК. Характер протекания зависимости  $M_T$  ЦС от параметров  $h_{CA}/D_1$ ,  $\pi_T$  и  $\varepsilon$  может быть различным при определенных комбинациях значений некоторых параметров.

Так, увеличение  $h_{CA}/D_1$  при малых значениях  $\bar{F}_{рк}$  и больших  $\bar{D}$  приводит к линейному убыванию  $M_T$ , а в противном случае – к возрастанию. Это связано с изменением вклада массы корпуса СА и массы РК в общую оценку массы турбины.

Наиболее существенно влияющим на массу фактором являются диаметральные размеры, т.е. параметр  $\bar{D}_M$ . На рис. 3 показано влияние  $\bar{D}_M$  на  $M_T$  при фиксировании остальных параметров на оптимальных по условию минимума массы уровнях с учетом технологических ограничений, указанных в данной работе и в [3]. Сравнение массовых характеристик турбин осевого и центростремительного типа при указанных условиях свидетельствует о незначительном преимуществе в этом отношении ЦС ТСММ при увеличении  $\bar{D}_M$ . Этот факт может позволить расширить область возможных конструктивных решений при проектировании турбоприводов.

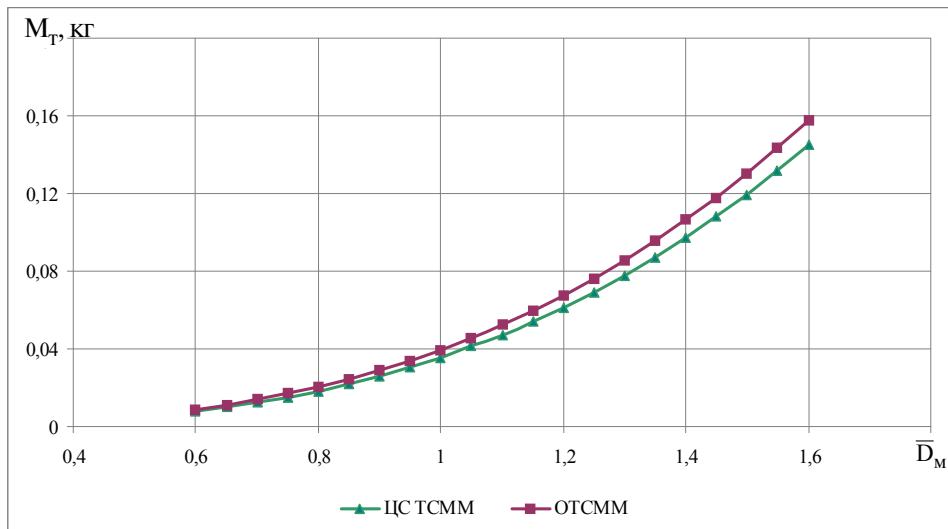


Рис. 3. Зависимость  $M_T$  от  $\bar{D}_M$  при значениях параметров  $Y_T = 0,3$ ;  $\pi_T = 3,525$ ;

$$h_{CA}/D_{(cp)} = 0,017; \alpha_{1эф} = 19^\circ; \varepsilon_O = 0,142; \varepsilon_{ЦС} = 0,1; \bar{D} = 0,845; (b/t)_{рк O} = 1; (b/t)_{рк ЦС} = 1,2;$$

$$\beta_{2эф O} = 40^\circ; \beta_{2эф ЦС} = 60^\circ; \bar{F}_{рк} = 0,975$$

Предложенная в статье аналитическая форма не всегда удобна как для проведения анализа воздействия одновременно нескольких параметров турбины, так и для последующей оптимизации этих параметров по массовым критериям. Поэтому путем статистической обработки значений  $V_T$  для 100 опытов планов эксперимента, рассчитанных по (1), были получены регрессионные выражения в виде квадратичных полиномов для

турбин двух типов течения рабочего тела. Низкая точность оценки критериев вблизи границ диапазона значений  $\bar{D}_M$ , вызванная существенным различием значений  $V_T$  и, соответственно,  $M_T$  в опытах с разными  $\bar{D}_M$ , обусловила необходимость разбиения диапазона варьирования фактора  $\bar{D}_M$  на пять частей с повторением вычис-

лительных экспериментов по плану эксперимента [3]. Это позволяет сократить разницу в значениях критериев при изменении  $\bar{D}_M$  относительно эксперимента по плану с полным диапазоном варьирования. В итоге было получено десять регрессионных выражений, адекватно оценивающих критерии с коэффициентами детерминации  $R^2 > 0,96$ . В таблице 1 приведены значения статистически значимых коэффициентов при соответствующих параметрах этих моделей. Свободный член обозначен как  $b_{св}$ . Из таблицы видно, что на  $M_{TЦС}$  влияет больше факторов, чем на  $M_{TЮ}$ , что обусловлено как конструктивными особенностями турбин двух типов, так и скрытым влиянием  $\pi_T$  на величины оптимальных перекрыш в ЦС ТСММ.

Окончание табл. 1

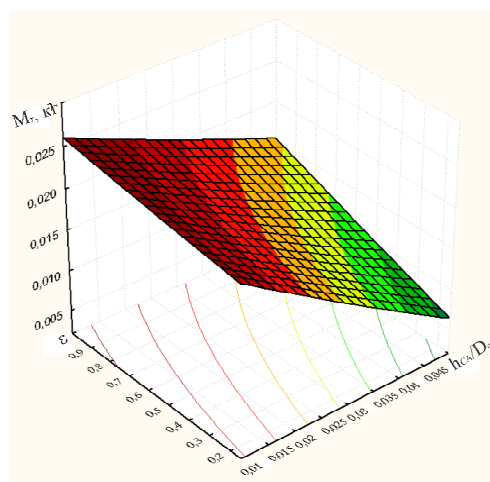
$h_{CA}/D_1 \times \alpha_{1эф}$	0,00765	0,00862	-	-	-
$\pi_T \varepsilon$	-0,00113	-0,00307	-0,00583	-0,01045	-0,02305
$(h_{CA}/D_1)\varepsilon$	0,1522	0,32	-	0,9218	1,6619
$\alpha_{1эф} \varepsilon$	-0,0003	-0,001	-0,00253	-0,00563	-0,00435
$\pi_T \bar{D}$	-	0,00336	0,0093	0,03536	0,03129
$h_{CA}/D_1 \times \bar{D}$	-0,4248	-1,449	-2,629	-3,0155	-8,2346
$\pi_T \bar{F}_{PK}$	-0,00064	-0,0015	-0,00345	-0,00837	-0,0015
$h_{CA}/D_1 \times \bar{F}_{PK}$	-	0,1381	0,5197	0,6861	1,2681
$\bar{D}\bar{F}_{PK}$	-0,0046	-0,0133	-	-0,07841	-0,1049
$h_{CA}/D_1 \times \bar{D}_M$	-	-	-	-	2,4956
$\varepsilon \bar{D}_M$	0,02098	0,03068	0,05438	0,09472	0,08504
$\bar{D}\bar{D}_M$	-0,06995	-0,08897	-0,31858	-0,41835	-0,4244
$b_{св}$	-0,0177	-0,02908	-0,11074	-0,1236	-0,19556

Таблица 1  
Коэффициенты регрессионных выражений для  $M_{TЮ}$  и  $M_{TЦС}$  ( $\rho = 2800 \text{ кг/м}^3$ )

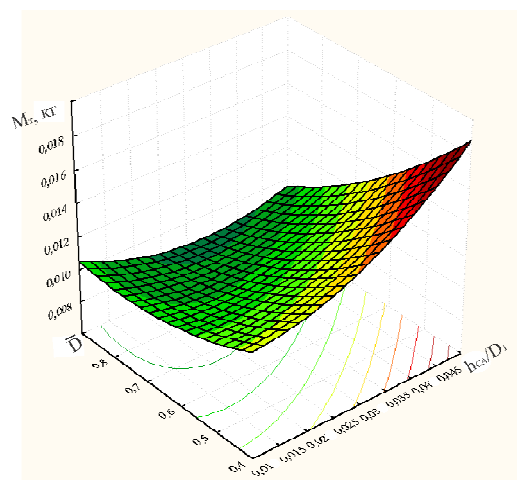
$x_i$	Значение коэффициента при факторе $x_i$ в выражении для $M_{TЮ}$				
	$\bar{D}=0,4...0,72$	$\bar{D}=0,72...1,04$	$\bar{D}=1,04...1,36$	$\bar{D}=1,36...1,68$	$\bar{D}=1,68...2$
$h_{CA}/D_{cp}$	-1,7534	-6,5808	-16,197	-35,915	-62,59
$(h_{CA}/D_{cp})^2$	0,6681	4,8388	9,811	40,453	36,183
$\varepsilon$	-0,0191	-0,0669	-0,1306	-0,332	-0,59
$(s/h)_{CA}$	-0,0053	-0,0241	-0,0519	-0,0953	-0,173
$\bar{D}_M$	-0,2615	-0,6972	-1,1056	-1,573	-2,686
$\bar{D}_M^2$	0,1605	0,2888	0,322	0,3426	0,514
$(h_{CA}/D_{cp})\varepsilon$	0,1693	0,8064	2,0267	3,6341	7,073
$h_{CA}/D_{cp} \times (s/h)_{CA}$	0,0683	0,2378	0,6007	1,2864	2,3111
$(h_{CA}/D_{cp}) \times \bar{D}_M$	3,4295	7,9774	14,3931	24,0159	35,498
$\varepsilon \bar{D}_M$	0,0363	0,0651	0,1136	0,2212	0,3144
$(s/h)_{CA} \bar{D}_M$	0,0093	0,0241	0,0427	0,06	0,0892
$b_{св}$	0,094	0,397	0,8578	1,6243	3,227

$x_i$	Значение коэффициента при факторе $x_i$ в выражении для $M_{TЦС}$				
	$\bar{D}=0,4...0,64$	$\bar{D}=0,64...0,88$	$\bar{D}=0,88...1,12$	$\bar{D}=1,12...1,36$	$\bar{D}=1,36...1,6$
$\pi_T^2$	0,00015	0,00031	0,00061	0,00158	0,00178
$h_{CA}/D_1$	-	0,4938	-	-	-
$(h_{CA}/D_1)^2$	3,4329	4,0673	28,1684	18,889	-
$\alpha_{1эф}$	$-9 \cdot 10^{-6}$	-	-	-	-
$\varepsilon^2$	-0,004	-	-	-	0,0344
$\bar{D}$	0,0262	-	0,2733	-	-
$\bar{D}^2$	0,0148	0,06355	-	0,30335	0,50131
$\bar{F}_{PK}$	0,0078	0,01733	-	0,09284	0,13683
$\bar{D}_M^2$	0,0756	0,08883	0,17673	0,22136	0,18733
$\pi_T \times (h_{CA}/D_1)$	-0,0165	-0,03862	-0,1013	-	-
$\pi_T \alpha_{1эф}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-



а



б

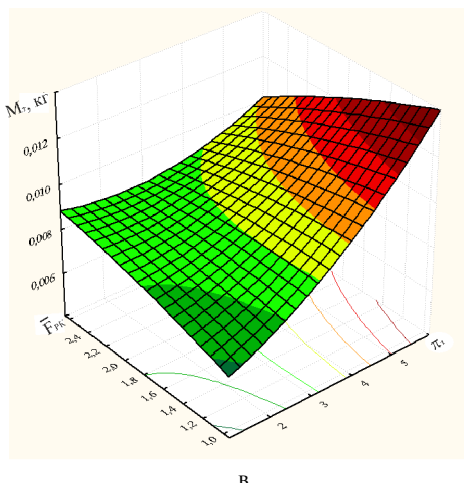


Рис. 4. Зависимости  $M_{ТО}$  и  $M_{ТЦС}$ :  
 а –  $M_{ТО} = f(h/D_{cp}, \epsilon)$ ; б –  $M_{ТЦС} = f(h/D_1, \bar{D})$ ;  
 в –  $M_{ТЦС} = f(\pi_T, \bar{F}_{PK})$

**Заключение**

В работе предложена методика определения объема и массы ОТСММ и ЦС ТСММ, справедливая в достаточно широких диапазонах варьирования важнейших параметров турбины. Проведено исследование влияния этих параметров на массу и объем РК. Разработанные математические модели могут использоваться при моделировании процессов испытания ТСММ и при решении оптимизационных задач.

**Литература**

1. Григорьев В.А. Анализ состояния проблемы повышения эффективности турбоприводов сверх-

малой мощности и пути ее решения [Текст] / В.А. Григорьев, Д.С. Калабухов, В.М. Радько, Н.Ф. Мусаткин // Авиационно-космическая техника и технология.- 2010.- №7.- С. 168-172.

2. Григорьев В.А. Выбор и обоснование критериев оценки эффективности турбоприводов сверхмалой мощности [Текст] / В.А. Григорьев, В.М. Радько, Д.С. Калабухов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докл. Междунар. научн.-техн. конф., Самара, 2011.- Ч.1.- С. 42-43.

3. Григорьев В.А. Выбор параметров турбоприводов основных схем при планировании эксперимента [Текст] / В.А. Григорьев, В.М. Радько, Д.С. Калабухов // Вестник Уфимского гос. авиац. техн. ун-та. – Уфа, 2012. – Т.16. - №2. – С.35-44.

4. Матвеев В.Н. Конструктивный способ улучшения технологичности рабочего лопаточного венца центростремительной микротурбины [Текст] / В.Н. Матвеев, Д.В. Сивиркин, Н.Т. Тихонов // Актуальные проблемы производства. Технология, организация, управление. – Самара, 1996.– С. 129-135.

5. Наталевич А.С. Воздушные микротурбины [Текст]/ А.С. Наталевич.– М.: Машиностроение, 1979.– 192 с.

6. Овсянников Б.В. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Б.В. Овсянников, Б.И. Боровский.- М.: Машиностроение, 1986. – 376 с.

Поступила в редакцию 01.06.2012

**В.О. Григорьев, В.М. Радько, Д.С. Калабухов. Розробка та дослідження математичних моделей обсягу і маси турбін надмалій потужності**

*Розроблено методику побудови математичних моделей об'єму та маси осевих (ОТНМП) і доцентрових турбін надмалій потужності (ДЦ ТНМП) із залученням методів математичної статистики. Проаналізовано вплив основних режимних і геометричних параметрів на масу турбін зазначених типів, проведено порівняння масових характеристик ОТНМП і ДЦ ТНМП при різних значеннях діаметральних габаритних параметрів. Наведено узагальнені регресійні математичні моделі маси, які можуть використовуватися при вирішенні завдання оптимізації параметрів турбін надмалій потужності з масових характеристик.*

**Ключові слова:** турбіна надмалій потужності, маса турбіни, оптимізація параметрів, регресійний аналіз.

**V.A. Grigoriev, V.M.Rad2 ko, D.S. Kalabuhov. Development and study of ultralow power turbine volume and mass mathematical models**

*A method of constructing mathematical models of volume and mass of the axial (AULPT) and centripetal ultralow power turbine (CULPT) using the methods of mathematical statistics is designed. The influence of the basic regime and geometric parameters on the mass of these turbine types, a comparison of AULPT and CULPT mass properties, and for different values of diametrical size parameters are analyzed. The generalized regression mathematical model of mass, which can be used to solve the problem of ultralow power turbine parameters optimizing by characteristics of the mass are given.*

**Key words:** ultralow power turbine, turbine mass, optimization of parameters, regression analysis.