

## ВЫБОР ДИАПАЗОНОВ И УРОВНЕЙ ВАРЬИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОДНОСТУПЕНЧАТЫХ ТУРБИН СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ

© 2011 В. А. Григорьев, В. М. Радько, Д. С. Калабухов

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Произведено определение центра эксперимента и шагов варьирования факторов плана эксперимента для испытаний турбин сверхмалой мощности (ТСММ) центростремительного (ЦСТСММ), осевого (ОТСММ) и центробежного (ЦБТСММ) типов. Определены рациональные диапазоны варьирования этих факторов с точки зрения возможности реализации разработанного ротатбельного ортогонального композиционного плана (РОЦКП), а также значения, которые принимают факторы на соответствующих уровнях варьирования.

*Планирование эксперимента, диапазоны варьирования, уровни варьирования, значение величины, режимные факторы, одноступенчатые турбины сверхмалой мощности, критерии оценки эффективности.*

### Введение

В статье [1] был проведён выбор влияющих факторов планируемого эксперимента, т.е. режимных и конструктивно-геометрических параметров, существенно влияющих на КПД, массогабаритные и технико-экономические показатели одноступенчатых осевых, центростремительных и центробежных ТСММ. Также в ней были сформированы оптимальные РОЦКП факторных экспериментов при испытаниях различных типов турбин и определены их основные параметры.

Следующий этап планирования эксперимента требует разработки матриц планирования для испытания турбин трёх типов, включающих не только кодированные, но и реальные значения факторов, соответствующих определённым уровням их варьирования.

#### 1. Определение центра эксперимента и шагов варьирования факторов плана эксперимента

Обычно центр эксперимента выбирается в центре диапазона варьирования следующим образом:

$$x_{i0} = \frac{1}{2}(x_{i\max} + x_{i\min}). \quad (1)$$

«Звёздным» точкам плана эксперимента соответствуют крайние значения диапазонов варьирования факторов. Тогда с помощью несложных преобразований шаг варьирования можно определить по формуле

$$\Delta x_i = \frac{1}{2\alpha}(x_{i\max} - x_{i\min}). \quad (2)$$

Значения факторов, соответствующих вершинам гиперкуба плана, определяются следующим образом:

$$x_{i-} = x_{i0} - \Delta x_i; \quad (3)$$

$$x_{i+} = x_{i0} + \Delta x_i. \quad (4)$$

Итак, для каждого фактора нужно подобрать диапазон варьирования его значениями и определить пять числовых значений, соответствующих пяти уровням варьирования:  $-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$ . При этом для всех матриц планирования в [1] было установлено, что  $\alpha = 2,828$ .

#### 2. Диапазоны и уровни варьирования режимных факторов $Y_T, \pi_T$ и фактора масштабности $\bar{D}_M$ одноступенчатых ТСММ различных типов

Диапазоны и уровни варьирования факторов  $Y_T, \pi_T, \bar{D}_M$ , а также остальных факто-

ров, рассматриваемых в данной статье, определялись с помощью специальной методики.

Сначала выбирается наиболее широкий диапазон варьирования некоторого фактора, опираясь на данные проведенных ранее однофакторных экспериментов. Затем определяются значения величин факторов, соответствующих пяти уровням варьирования, и рассматриваются все возможные комбинации уровней связанных между собой факторов, исходя из матрицы планирования. Далее проверяется, не выходит ли значение какого-либо параметра, связывающего рассматриваемые факторы (контролирующий параметр), за диапазон его допустимых значений при каждой из возможных комбинаций уровней варьирования факторов. Если значение контролирующего параметра хотя бы при одной комбинации уровней варьирования выходит за диапазон его допустимых значений, то сужается диапазон варьирования того фактора, изменение которого допустимо в конкретном случае.

Данные работы [2] позволяют сделать вывод, что в плане эксперимента следует варьировать фактор  $Y_T$  в диапазоне значений  $0,1 \dots 0,7$ , а фактор  $\pi_T$  в диапазоне значений  $1,05 \dots 6$  для ЦСТСММ и ОТСММ. При этом для плана эксперимента при испытаниях ЦБТСММ согласно [3] целесообразно принять диапазоны значений  $\pi_T = 1,05 \dots 6$  и  $Y_T = 0,1 \dots 0,4$ . Однако самые современные тормозные установки для испытаний ТСММ имеют ограничение по частоте вращения турбины  $n \leq 140000$  об/мин [4], поэтому необходимо проверить, соблюдается ли это условие проведения эксперимента при принятых диапазонах варьирования.

Параметр  $n$  определяется факторами  $\pi_T$ ,  $Y_T$  и параметром  $D_{I(ср)}$

$$n = \frac{60Y_T \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_0^* \left( 1 - \frac{1}{\pi_T^k} \right)}}{\pi D_{I(ср)}}. \quad (5)$$

В обозначенных выше работах указывается, что ЦСТСММ характеризуются величинами  $D_1 = 20 \dots 80$  мм, а ОТСММ могут иметь  $D_{ср} = 20 \dots 100$  мм. Исследования, проведенные авторами статьи, показали, что реализация РОЦКП при испытаниях ЦБТСММ возможна, если  $D_1 = 20 \dots 50$  мм.

С учётом того, что большинство испытуемых ранее ЦСТСММ и ОТСММ имели  $D_{I(ср)} \approx 50$  мм, а ЦБТСММ –  $D_1 = 32$  мм [3, 5–14], принимаем в качестве исходных значения  $D_{I(ср)исп} = 50$  мм и  $D_{I(ср)исп} = 32$  мм для соответствующих типов турбин. Тогда диапазон варьирования фактора  $\bar{D}_M$  примем равным  $0,4 \dots 1,6$  для ЦСТСММ,  $0,4 \dots 2$  для ОТСММ и  $0,625 \dots 1,5625$  для ЦБТСММ.

Рассмотрим все возможные комбинации уровней этих факторов в принятом нами РОЦКП для ЦСТСММ и ОТСММ (табл. 1). Числовые значения факторов, соответствующие уровням, определяются с помощью формул (1)–(4). Значения  $n$  определяются по формуле (5).

В скобках в табл. 1 указаны значения  $\bar{D}_M$  и  $n$  для ОТСММ.

При проведении эксперимента в качестве рабочего тела принимается воздух ( $k=1,4$ ,  $R = 287$  кДж/кг·К), температура которого на входе в сопловой аппарат (СА)  $T_0^* = 288$  К.

В принятых диапазонах варьирования факторами  $\pi_T$ ,  $Y_T$  и  $\bar{D}_M$  в опытах №51 и №79 потребная частота вращения турбины превышает допустимую. Поэтому диапазон значений  $Y_T = 0,1 \dots 0,7$  приходится сузить, т. е. уменьшить максимальное значение  $Y_T$  до  $0,58$ . Тогда  $n_{max} = 138093$  об/мин.

Поскольку при испытаниях ЦБТСММ  $Y_{Tmax} = 0,4$ , очевидно, что для неё  $n_{max} \leq 140000$  об/мин.

Итак, принимаем следующие диапазоны варьирования факторов  $Y_T$ ,  $\pi_T$ ,  $\bar{D}_M$  и значения их величин на уровнях варьирования факторов  $Y_T$ ,  $\pi_T$ ,  $\bar{D}_M$  и значения их величин на уровнях варьирования РОЦКП:

Таблица 1

№ опыта	$x_1 = Y_T$		$x_2 = \pi_T$		$x_{10} = \bar{D}_M$		$n, \text{об/мин}$
	$\bar{1}$	0,294	$\bar{1}$	1,925	1	1,212 (1,483)	
1	$\bar{1}$	0,294	$\bar{1}$	1,925	1	1,212 (1,483)	29197 (23862)
3	$\bar{1}$	0,294	$\bar{1}$	1,925	-1	0,788 (0,917)	44780 (38481)
17	$\bar{1}$	0,294	1	4,4	-1	0,788 (0,917)	63683 (54724)
19	$\bar{1}$	0,294	1	4,4	1	1,212 (1,483)	41404 (33838)
33	1	0,506	$\bar{1}$	1,925	-1	0,788 (0,917)	77072 (66229)
35	1	0,506	$\bar{1}$	1,925	1	1,212 (1,483)	50110 (40953)
49	1	0,506	1	4,4	1	1,212 (1,483)	71260 (58238)
51	1	0,506	1	4,4	-1	0,788 (0,917)	109603 (94185)
65	$\bar{\alpha}$	0,1	0	3,525	0	1 (1,2)	15974 (13311)
66	$\alpha$	0,7	0	3,525	0	1 (1,2)	111821 (93184)
67	0	0,4	$\bar{\alpha}$	1,05	0	1 (1,2)	13673 (11394)
68	0	0,4	$\alpha$	6	0	1 (1,2)	73563 (61302)
83	0	0,4	0	3,525	$-\alpha$	0,4 (0,4)	159745 (159745)
84	0	0,4	0	3,525	$\alpha$	1,6 (2)	39936 (31949)
85	0	0,4	0	3,525	0	1 (1,2)	63898 (53248)

$$x_1 = \begin{cases} 0,1 \dots 0,58 (0,1; 0,255; 0,34; 0,425; 0,58) \\ \text{для ЦСТСММ и ОТСММ;} \\ 0,1 \dots 0,4 (0,1; 0,197; 0,25; 0,303; 0,4) \\ \text{для ЦБТСММ;} \end{cases}$$

$$x_2 = 1,05 \dots 6 (1,05; 2,65; 3,525; 4,4; 6);$$

$$x_{10} = \begin{cases} 0,4 \dots 1,6 (0,4; 0,788; 1; 1,212; 1,6) \\ \text{для ЦСТСММ} \\ 0,4 \dots 2 (0,4; 0,917; 1,2; 1,483; 2) \\ \text{для ОТСММ;} \\ 0,625 \dots 2,5 (0,625; 1,231; 1,5625; \\ 1,894; 2,5) \text{ для ЦБТСММ.} \end{cases}$$

### 3. Диапазоны и уровни варьирования

фактора  $\frac{h_{CA}}{D_{1(ср)}}$  одноступенчатых ТСММ различных типов

Согласно [2], ТСММ характеризуются значениями параметра относительной высоты решётки соплового аппарата (СА)  $\frac{h_{CA}}{D_{1(ср)}} = 0,005 \dots 0,05$ . Как уже отмечалось, в ТСММ диапазон значений параметра  $D_{1(ср)} = 20 \dots 50$  (80; 100) мм, при этом к ТСММ относятся турбины с  $h_{CA} \leq 5$  мм.

В этом случае в РОЦКП при некоторых комбинациях уровней варьирования факторов  $\frac{h_{CA}}{D_{1(ср)}}$  и  $\bar{D}_M$  величина высоты решётки СА может превышать допустимую или, наоборот, принимать нерационально малые значения  $h_{CA} \leq 0,35$  м.

Проверим, выходит ли высота лопатки ОТСММ за условленный диапазон значений  $h_{CA} = 0,35 \dots 5$  мм в плане эксперимента при  $\frac{h_{CA}}{D_{1(ср)}} = 0,005 \dots 0,05$  с помощью табл. 2.

Таблица 2

№ опы та	$x_3 = \frac{h_{CA}}{D_{ср}}$		$x_{10} = \bar{D}_M$		$h_{CA}$ , мм
	-1	0,0195	-1	0,917	
3	-1	0,0195	-1	0,917	0,89
5	-1	0,0195	1	1,483	1,44
9	1	0,0354	-1	0,917	1,62
11	1	0,0354	1	1,483	2,6
90	$-\alpha$	0,005	0	1,2	0,3
91	$\alpha$	0,05	0	1,2	3
83	0	0,0275	$-\alpha$	0,4	0,55
84	0	0,0275	$\alpha$	2	2,75
85	0	0,0275	0	1,2	1,65

Высота лопатки ОТСММ выходит за нижнюю границу условленного диапазона значений  $h_{CA} = 0,35 \dots 5$  мм при диапазоне варьирования  $x_3 = \frac{h_{CA}}{D_{ср}} = 0,005 \dots 0,05$ .

Для ЦСТСММ и ЦБТСММ также можно получить похожие результаты. Поскольку минимальное значение  $h_{CA}$  достигается в опыте №90, нетрудно вычислить

$$x_{3 \min} = \frac{h_{CA \min}}{D_{1(ср)0 \min}} = \frac{0,0005}{0,05} = 0,01. \quad (6)$$

Тогда значения величин этого фактора на уровнях варьирования РОЦКП будут равными 0,01; 0,023; 0,03; 0,037; 0,05.

### 4. Диапазон и уровни варьирования фактором $\alpha_{1\phi}$ одноступенчатой ЦСТСММ

У ЦСТСММ приняты в практике проектирования диапазоны значений эффективного угла выхода потока из СА  $\alpha_{1\phi} = 6 \dots 25^\circ$  [5]. Нижняя граница этого диапазона соответствует минимально возможному с конструктивной точки зрения углу  $\alpha_{1\phi}$ , удовлетворяющего условию неподрезания длинной стенки канала сопловой решётки:  $\varphi_{подр} = 0$  (рис. 1,а). Верхняя граница диапазона выбрана исходя из условия приемлемого выполнения сопловым аппаратом своих функций разгона и поворота потока.

Фактор  $\alpha_{1\phi}$  определяется следующим выражением (рис. 1,б):

$$\alpha_{1\phi} = \arcsin \frac{a_{z \text{ CA}} (1 + \bar{\delta}_{кр \text{ CA}})}{t_{CA}} = \arcsin \left[ \frac{a_{z \text{ CA}} \cdot (1 + \bar{\delta}_{кр \text{ CA}}) z_{CA}^{\varepsilon=1}}{D_1 \pi (1 + 2\bar{\delta}_r)} \right], \quad (7)$$

где  $\bar{\delta}_{r \text{ рад}} = 0,005 \dots 0,01$  – относительный радиальный зазор между СА и РК в ЦСТСММ [6].

Фактор относительной толщины выходной кромки СА  $\bar{\delta}_{кр \text{ CA}}$  оказывает различ-

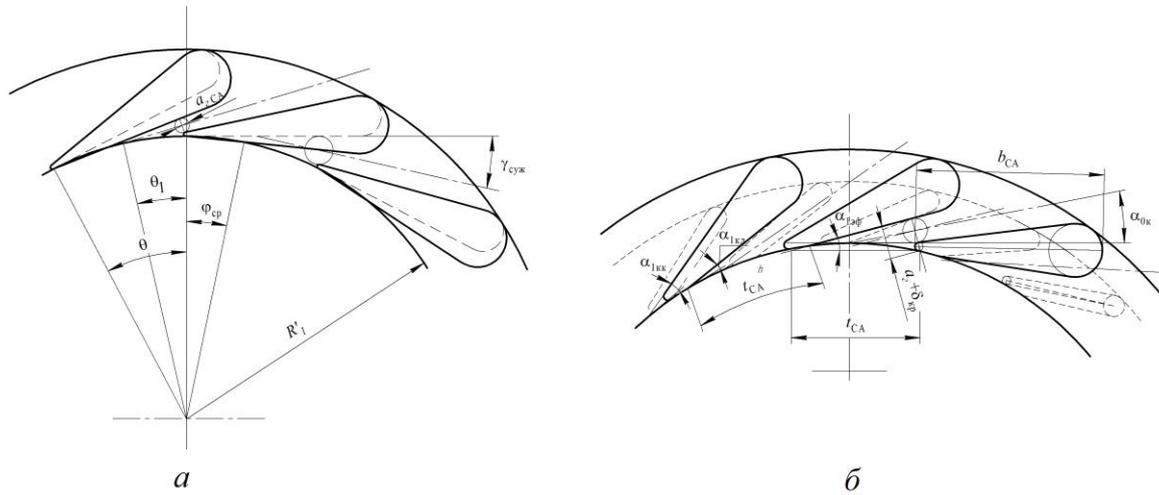


Рис. 1. Схемы построения решётки СА ЦСТСММ:  
 а) неправильное построение решётки профилей лопаток;  
 б) правильное построение решётки профилей лопаток

ное воздействие на мощностной КПД турбин разных типов [7]. На КПД ЦСТСММ в диапазоне значений  $0,14 \dots 0,3$  этот фактор не оказывает влияния, поэтому с точки зрения повышения технологичности изготовления СА следует принимать  $\bar{\delta}_{кр\text{CA}} = 0,3$ . Теоретически возможно варьирование угла  $\alpha_{1\text{эф}}$  при одновременном изменении относительного

горла  $\frac{a_{z\text{CA}}}{D_1}$  и числа каналов  $z^{\varepsilon=1}_{\text{CA}}$ , что могло бы позволить принять величину относительного горла в качестве варьируемого фактора. Однако подробный анализ этой воз-

можности показал, что  $\frac{a_{z\text{CA}}}{D_1}$  не может быть влияющим фактором эксперимента при варьировании  $\alpha_{1\text{эф}}$  в диапазоне значений  $6 \dots 25^\circ$ , поскольку область возможных соче-

таний значений параметров  $\alpha_{1\text{эф}}$  и  $\frac{a_{z\text{CA}}}{D_1}$  позволяет провести лишь часть опытов, запланированных в эксперименте. Более того, значения  $\alpha_{1\text{эф}} = 6 \dots 9,2^\circ$  не могут быть реализо-

ваны ни при каком значении  $\frac{a_{z\text{CA}}}{D_1}$ . Для того, чтобы обеспечить технологически возможную величину  $a_{r\text{CA}} \geq 0,72$  мм при любых  $\bar{D}_M$ ,

необходимо принять диапазон варьирования фактором  $\alpha_{1\text{эф}}$  и его значения на уровнях варьирования  $x_4 = \alpha_{1\text{эф}} = 9,2 \dots 25^\circ$  ( $9,2^\circ$ ;  $14,31^\circ$ ;  $17,1^\circ$ ;  $19,89^\circ$ ;  $25^\circ$ ). Тогда варьирование величины  $\alpha_{1\text{эф}}$  в процессе эксперимента осуществ-

ляется изменением  $z^{\varepsilon=1}_{\text{CA}}$  при  $\frac{a_{z\text{CA}}}{D_1} = 0,036 = \text{const}$ .

Важно отметить, что в плане эксперимента должно быть обеспечено целое число сопловых или межлопаточных каналов  $z^{\varepsilon=1}_{\text{CA}}$ . Для определения  $z^{\varepsilon=1}_{\text{CA}}$  было получено следующее выражение:

$$z^{\varepsilon=1}_{\text{CA}} = \pi \left(1 + 2\bar{\delta}_r\right) \cdot \left(\frac{h}{b}\right)_{\text{CA}} \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{CA}} \left(\frac{h_{\text{CA}}}{D_{\text{cp}}}\right)^{-1}. \quad (8)$$

Установлено, что относительный шаг решётки СА  $\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{CA}}$  практически не влияет на КПД ЦСТСММ в принятом на практике диапазоне значений  $1,2 \dots 2,2$  [8]. Поэтому из соображений улучшения технологичности изготовления ТСММ, уменьшения массы и диаметральных габаритов рекомендуется при-

нимать  $\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{CA}} = 1,2 \dots 1,3$ . Изменением в этом

диапазоне  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA}$  путём корректировки значения шага  $t_{CA}$  можно достичь целого числа  $z_{CA}^{\varepsilon=1}$ .

**5. Диапазоны и уровни варьирования**

факторами  $\alpha_{1\text{эф}}$ ,  $\bar{\delta}_{кр CA}$ ,  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA}$  и  $\frac{s_{CA}}{h_{CA}}$

**одноступенчатой ОТСММ**

Для любой из форм образования канала решётки СА (рис. 2) угол  $\alpha_{1\text{эф}}$  определяется по следующей формуле:

$$\alpha_{1\text{эф}} = \arcsin \frac{a_{z CA} (1 + \bar{\delta}_{кр CA})}{t_{CA}} = \arcsin \left[ \frac{a_{z CA} \cdot (1 + \bar{\delta}_{кр CA}) z^{\varepsilon=1}_{CA}}{D_{cp} \cdot \pi} \right] \tag{9}$$

У ОТСММ приняты в практике проектирования диапазоны значений  $\alpha_{1\text{эф}} = 5 \dots 24^\circ$  [9]. Нижняя граница этого диапазона соответствует минимально возможному с конструктивной точки зрения углу  $\alpha_{1\text{эф}}$ . Верхняя граница диапазона выбрана исходя из условия приемлемого выполнения сопловым аппаратом своих функций разгона и поворота потока.

Ширина сверхзвукового канала на входе в участок косога среза (рис. 2,б)

$$a_{с CA} = \frac{a_{z CA}}{q(\lambda_{1s})} = \frac{\pi D_{cp} \sin \alpha_{1\text{эф}}}{z_{CA}^{\varepsilon=1} (1 + \bar{\delta}_{кр CA}) q(\lambda_{1s})}, \tag{10}$$

т. е. зависит не только от конструктивно-геометрических, но и режимных параметров.

Как и в случае с ЦСТСММ, варьировать фактор  $\frac{a_{z CA}}{D_{cp}}$  оказалось невозможно, поскольку кроме  $\alpha_{1\text{эф}}$  варьируемым фактором является также  $\bar{\delta}_{кр CA}$ , изменение которого в процессе эксперимента сопровождается некоторым изменением величины  $a_{z CA}$  из-за условия независимости названных факторов. Зато его можно и нужно (с целью сохранения оптимальности РОЦКП) использовать для обеспечения целого числа каналов  $z_{CA}^{\varepsilon=1}$ .

Принимаем начальное значение  $\frac{a_{z CA}}{D_{cp}} = 0,036$ ,

т. е. такое же, как у ЦСТСММ.

Для ОТСММ весьма важными являются параметры удлинения лопаточных венцов

$\frac{s_{CA}}{h_{CA}}$  и  $\frac{s_{ПК}}{h_{ПК}}$  СА и рабочего колеса (ПК). Они характеризуют осевые габариты турбины и, соответственно, его массу. Но в отличие от удлинения решётки СА удлинение решётки ПК в широком диапазоне значений  $\frac{h_{ПК}}{s_{ПК}} = 3,5 \dots 7$  не влияет на КПД. Поэтому с

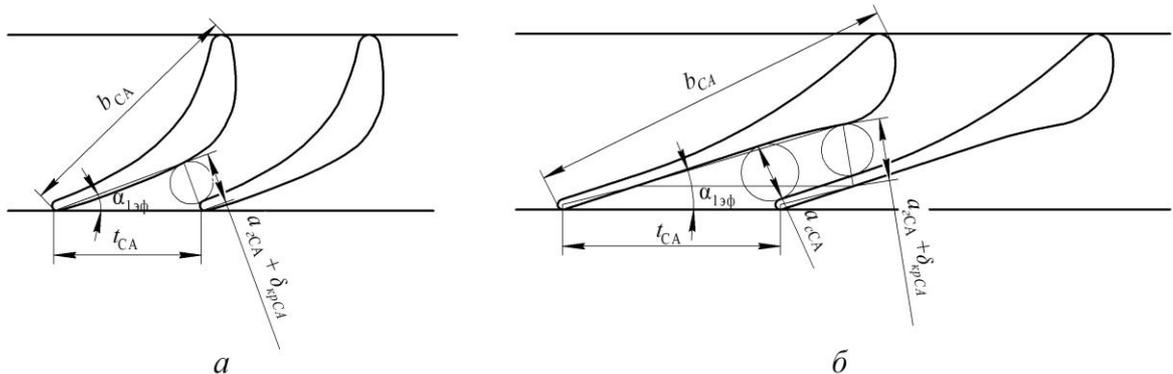


Рис. 2. Профили лопаток и межлопаточные каналы СА ОТСММ:  
 а) конфузурный канал, образованный дозвуковыми профилями;  
 б) канал в форме сопла Лаваля, образованный сверхзвуковыми профилями

целью уменьшения массы и габаритов при проектировании ОТСММ принимаются значения

$\frac{s_{PK}}{h_{PK}}$  из окрестности нижней границы

указанного диапазона. Фактор  $\frac{s_{CA}}{h_{CA}}$  необходимо варьировать в диапазоне значений 3,2...7,8 [10].

Удлинение решётки СА связано со следующими факторами:

$$\frac{s_{CA}}{h_{CA}} = \frac{\left(\frac{a_{zCA}}{D_{cp}}\right) \cdot \left(\frac{b}{t}\right)_{CA} (1 + \bar{\delta}_{крCA}) \cdot \sin \gamma_{уст}}{\left(\frac{h_{CA}}{D_{cp}}\right) \cdot \sin \alpha_{1эф}}, \quad (11)$$

где  $\gamma_{уст}$  – угол установки решётки. Этот конструктивный параметр выражается через параметры  $a_{zCA}$ ,  $b_{CA}$ ,  $\alpha_{1эф}$  и параметры профиля с помощью сложной зависимости и на этапе начального проектирования не является известным. Поэтому в эксперименте целесообразно принять  $\gamma_{уст} = const$ .

Сравнивая результаты работы [8] и [10],

можно заметить, что  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA}$  иначе влияет на

КПД ОТСММ, чем на КПД ЦСТСММ. Зависимость  $\eta_e = f\left[\left(\frac{b}{t}\right)_{CA}\right]$  близка к квадратичной в диапазоне характерных значений 1...1,7. В этом диапазоне КПД может изменяться до 10%. Кроме того, в работе [10] установлено, что зависимости  $\eta_e = f\left[\left(\frac{b}{t}\right)_{CA}\right]$

и  $\eta_e = f\left[\left(\frac{b}{t}\right)_{PK}\right]$  практически идентичны и

допустимо принять  $x_7 = \left(\frac{b}{t}\right)_{CA} = \left(\frac{b}{t}\right)_{PK}$ . По-

этому  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA}$  включается в состав варьируемых факторов. Можно выделить два основ-

ных способа изменения  $\frac{s_{CA}}{h_{CA}}$  в процессе экс-

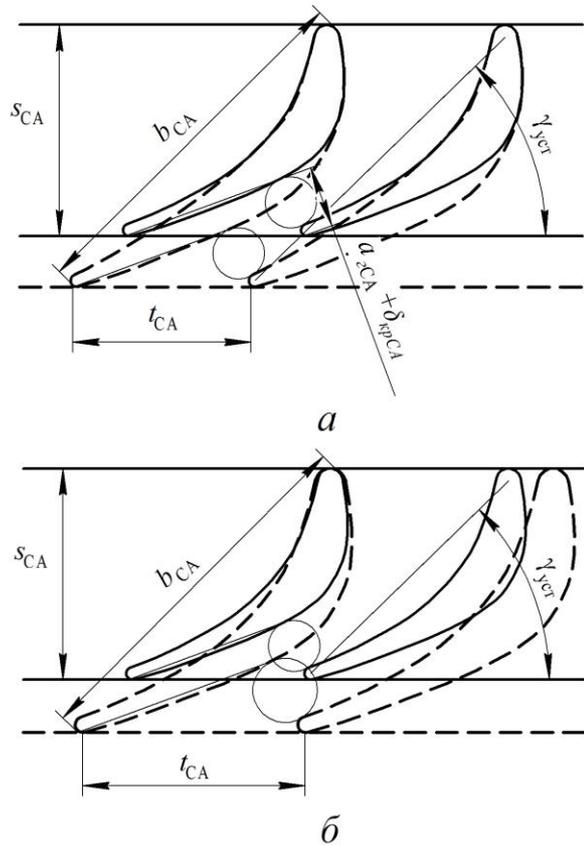


Рис.3. Способы изменения величины

фактора  $\frac{s_{CA}}{h_{CA}}$  в эксперименте: а)  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA} = var$  ;

б) изменение  $b_{CA}$  и  $t_{CA}$  при сохранении  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA} = const$

перимента. На рис. 3,а показан способ варьирования этого фактора путём изменения

$\left(\frac{b}{t}\right)_{CA}$  и сохранения остальных параметров

в выражении (9) постоянными. В этом случае изменяется кривизна образующих лопаток, что вносит свой вклад в изменение КПД турбины. На рис. 3,б показан способ варьирования

$\frac{s_{CA}}{h_{CA}}$  путём изменения шага и хорды

лопатки при  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA} = const$ . В этом случае

профили лопаток подобны, но для сохранения  $\alpha_{1эф} = const$  требуется изменение значе-

ния произведения  $a_{zCA} (1 + \bar{\delta}_{крCA})$ , а значит

и  $\frac{a_{2CA}}{D_{cp}}$ . Очевидно, что в нашем случае при постановке эксперимента необходимо изменить оба способа.

После анализа матрицы планирования получены следующие диапазоны варьирования факторов:  $\alpha_{1\phi}$ ,  $\bar{\delta}_{кр CA}$ ,  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA}$ ,  $\frac{s_{CA}}{h_{CA}}$  ОТСММ и значения их величин на уровнях варьирования, позволяющие реализовать РОЦКП с допустимыми значениями параметра  $a_{2CA} = 1 \dots 5$  мм:

$$x_4 = \alpha_{1\phi} = 5 \dots 24^\circ (5; 11,14^\circ; 14,5^\circ; 17,86^\circ; 24^\circ);$$

$$x_6 = \bar{\delta}_{кр CA} = 0,14 \dots 0,42 (0,14; 0,231; 0,28; 0,329; 0,42);$$

$$x_7 = \left(\frac{b}{t}\right)_{CA} = 1 \dots 1,7 (1; 1,226; 1,35; 1,474; 1,7);$$

$$x_9 = \frac{s_{CA}}{h_{CA}} = 3,2 \dots 7,8 (3,2; 4,69; 5,5; 6,31; 7,8).$$

### 6. Диапазоны и уровни варьирования фактором $\varepsilon$ одноступенчатых ТСММ различных типов

Степень парциальности  $\varepsilon$  определяется как отношение длины дуги, занятой каналами СА к периметру окружности облопачивания

$$\varepsilon = \frac{(D_{1(cp)}/2)\theta_{дуг}}{\pi D_{1(cp)}} = \frac{\theta_{дуг}}{2\pi}, \quad (12)$$

где  $\theta_{дуг}$  – угол дуги, образованной межлопаточным или сопловым каналом. Для того, чтобы проанализировать после проведения эксперимента влияние степени парциальности на критерии оценки эффективности, необходимо наличие опытов, в которых при изменении  $\varepsilon$  сохраняется геометрическое

подобие каналов СА и кинематическое подобие потока, протекающего через них. По-

$$\text{этому } \frac{\theta_{дуг}}{2\pi} = \frac{z_{CA}t}{z_{CA}^{\varepsilon=1}t} = \frac{z_{CA}}{z_{CA}^{\varepsilon=1}}, \text{ а значит степень}$$

парциальности представляет собой отношение реального числа каналов СА к числу каналов СА при значении этого параметра, равного 1.

При определённых сочетаниях параметров  $D_{1(cp)}$ ,  $\alpha_{1\phi}$ ,  $a_{2CA}$  в плане эксперимента будет достигнуто минимальное число  $z_{CA \min} = z_{CA \min}^{\varepsilon=1}$  в случае  $\varepsilon = 1$ . В других опытах потребуется сохранить величины названных параметров при других значениях  $\varepsilon$ . Поэтому нужно знать минимально реализуемую степень парциальности в эксперименте в целом:

$$\varepsilon_{\min} = \frac{z_{CA \min}^{\varepsilon=1}}{z_{CA \min}^{\varepsilon=1}} = \frac{1}{z_{CA \min}^{\varepsilon=1}}. \quad (13)$$

В планируемых экспериментах у ЦБТСММ  $z_{CA \min}^{\varepsilon=1} = 14$ , у ЦСТСММ  $z_{CA \min}^{\varepsilon=1} = 10$ , а у ОТСММ  $z_{CA \min}^{\varepsilon=1} = 7$  и, соответственно,  $\varepsilon_{\min} = 0,071$ ,  $\varepsilon_{\min} = 0,1$  и  $\varepsilon_{\min} = 0,143$ . Поэтому принимаем следующие диапазоны варьирования фактором  $\varepsilon$  и значения его величины на уровнях варьирования РОЦКП:

$$x_5 = \varepsilon_{\min} = \begin{cases} 0,071 \dots 1 (0,071; 0,371; 0,535; 0,699; 1) \\ \text{для ЦБТСММ;} \\ 0,1 \dots 1 (0,1; 0,391; 0,55; 0,709; 1) \\ \text{для ЦСТСММ;} \\ 0,142 \dots 1 (0,142; 0,419; 0,571; 0,723; 1) \\ \text{для ОТСММ.} \end{cases}$$

Для обеспечения целого числа  $z_{CA}$  при данных значениях  $\varepsilon$  необходимо корректировать значение шага  $t_{CA}$ , а для сохранения при-

нятых в эксперименте значений  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA}$  и  $\alpha_{1\phi}$  соответственно корректируются  $b_{CA}$  и  $a_{2CA}$ .

## 7. Диапазоны и уровни варьирования

факторами  $\left(\frac{b}{t_{\text{ср}}}\right)_{\text{РК}}$ ,  $\bar{D}$ ,  $\beta_{2\text{эф}}$  и  $\bar{F}_{\text{РК}}$

### одноступенчатой ЦСТСММ

В работе [11] изучалось влияние пара-

метра  $\left(\frac{b}{t_{\text{ср}}}\right)_{\text{РК}}$  не только на КПД ЦСТСММ,

но и на трудоёмкость изготовления лопаточного венца в диапазоне значений 1,2...2,2. Анализ представленных в ней графиков показал, что и для планируемого эксперимента целесообразно выделить отмеченный выше диапазон значений данного фактора.

Фактор  $\left(\frac{b}{t_{\text{ср}}}\right)_{\text{РК}}$  связан с факторами  $\bar{D}$ ,

$\bar{D}_M$ , и  $\beta_{2\text{эф}}$  следующим соотношением:

$$\left(\frac{b}{t_{\text{ср}}}\right)_{\text{РК}} = \bar{D} \frac{1 - \bar{D}}{1 + \bar{D}} \cdot \frac{\bar{D}_M D_{\text{лисп}} \sin \beta_{2\text{эф}}}{a_{\text{РК}}}. \quad (14)$$

Соотношение диаметров на входе и выходе  $\bar{D}$  в работе [2] варьировались в диапазоне значений 0,404...0,909 при  $D_{\text{лисп}} = 49,5$  мм. В нашем случае при  $D_{\text{лисп}} = 50$  мм следует варьировать фактор  $\bar{D}$  в диапазоне значений 0,4...0,9.

В работе [12] описано экспериментальное исследование влияния эффективного угла  $\beta_{2\text{эф}}$  выхода потока из РК на КПД ЦСТСММ в диапазоне значений 15...90°. Было обнаружено, что коэффициент скорости в РК  $\psi_{\text{РК}}$  принимает максимальное значение при  $\beta_{2\text{эф}} = 25^\circ$ , но в то же время при значениях  $\pi_{\text{т}} < 4$  КПД турбины сохраняется примерно постоянным в диапазоне значений  $\beta_{2\text{эф}} = 15...60^\circ$ . К тому же увеличение угла  $\beta_{2\text{эф}}$  упрощает изготовление лопаточных венцов РК. Поэтому в эксперименте представляется целесообразным варьировать фактор  $\beta_{2\text{эф}}$  в диапазоне значений 15...60° с целью определения рациональных областей значений этого параметра по критериям оценки эффективности ТСММ.

В выражении (14) фигурирует лишь один параметр, который в плане эксперимента может являться контролирующим – горло канала РК  $a_{\text{РК}}$ . При этом значение параметра  $a_{\text{РК}}$  корректируется для обеспечения целого числа лопаток  $z_{\text{РК}}$ .

Первоначально в некоторых опытах матрицы планирования значения контролирующего параметра выходили за пределы допустимых. Увеличением или уменьшением  $a_{\text{РК}}$  путем соответствующего уменьшения или увеличения числа лопаток РК был обеспечен допустимый диапазон  $a_{\text{РК}} = 1...5$  мм.

При проведении эксперимента фактор

$\left(\frac{b}{t_{\text{ср}}}\right)_{\text{РК}}$  варьировался в опытах путём изменения  $t_{\text{ср}}_{\text{РК}}$ , а  $\beta_{2\text{эф}}$  выдерживался постоянным с помощью изменения  $a_{\text{РК}}$  (рис. 4).

Фактор, учитывающий отношение площади на выходе из РК к площади на входе  $\bar{F}_{\text{РК}}$ , представляет собой произведение уже рассмотренного соотношения  $\bar{D}$  и отношения высоты лопатки на выходе из РК к высоте лопатки на входе в него  $\bar{h}_{\text{РК}}$ . В работе [13] изучено как влияние  $\bar{h}_{\text{РК}}$  на КПД ЦСТСММ, так и  $\bar{F}_{\text{РК}}$ , но также показано, что последний параметр удобнее использовать в качестве оптимизируемого в задаче оптимизации. Справедливо и задание  $\bar{F}_{\text{РК}}$  как варьированного фактора эксперимента, так как он не требует при анализе его связи с фактором  $\bar{D}$  значений кинематических параметров  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и  $\psi_{\text{РК}}$ .

Из [13] следует, что  $\bar{F}_{\text{РК}}$  варьируется в широком диапазоне значений 0,65...3,3. Возможность варьирования фактором  $\bar{F}_{\text{РК}}$  в данном диапазоне при проведении факторного эксперимента проверялась с помощью контролирующего параметра матрицы планирования  $\bar{h}_{\text{РК}}$ , который может принимать значения 1,5...4,5. Проверка показала, что варьировать фактор  $\bar{F}_{\text{РК}}$  в диапазоне значений

0,65...3,3 нельзя, поскольку значения параметра  $\bar{h}_{\text{РК}}$  в этом случае выходят за пределы допустимых. Допустимый диапазон варьирования  $\bar{F}_{\text{РК}} = 0,975...2,458$ .

В итоге были приняты следующие диапазоны варьирования факторов  $\bar{D}$ ,  $\left(\frac{b}{t_{\text{сп}}}\right)_{\text{РК}}$ ,  $\beta_{2\text{эф}}$  и  $\bar{F}_{\text{РК}}$  ЦТСММ и значения их величин на уровнях варьирования РОЦКП:

$$x_6 = \bar{D} = 0,4...0,9 (0,4; 0,561; 0,65; 0,738; 0,9);$$

$$x_7 = \left(\frac{b}{t_{\text{сп}}}\right)_{\text{РК}} = 1,2 \dots 2,2 (1,2; 1,523; 1,7; 1,877; 2,2);$$

$$x_8 = \beta_{2\text{эф}} = 15...60^\circ (15^\circ; 29,54; 37,5; 45,46; 60^\circ);$$

$$x_9 = \bar{F}_{\text{РК}} = 0,975...2,458 (0,975; 1,508; 1,8; 2,092; 2,625).$$

### 8. Диапазоны и уровни варьирования

**факторами  $\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{РК}}$  и  $\beta_{2\text{эф}}$**

**одноступенчатой ОТСММ**

В разделе 5 было установлено, что при планировании эксперимента с ОТСММ целесообразно принять  $x_7 = \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{СА}} = \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{РК}}$ .

Поэтому диапазоны и уровни варьирования

факторов  $\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{СА}}$  и  $\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{РК}}$  одинаковы.

В [13] описано экспериментальное исследование влияния эффективного угла  $\beta_{2\text{эф}}$  выхода потока из РК на энергетическую эффективность ОТСММ в диапазоне значений  $15...40^\circ$ . Было обнаружено, что и коэффициент скорости  $\psi_{\text{РК}}$  и КПД турбины принимают максимальные значения при  $\beta_{2\text{эф}} = 20^\circ$  во всём диапазоне исследованных значений  $\pi$ .

В приведённом диапазоне значений  $\beta_{2\text{эф}}$  величина КПД изменяется максимум на 7%. Однако при увеличении  $\beta_{2\text{эф}}$  от  $15$  до  $40^\circ$  следует ожидать существенного упрощения технологичности изготовления лопаточных венцов РК. Поэтому в эксперименте целесообразно варьировать фактор  $\beta_{2\text{эф}}$  в диапазоне значений  $15...40^\circ$  с целью определения рациональных областей значений этого параметра по критериям оценки эффективности ТСММ.

Принимаем следующие диапазоны ва-

рьирования факторов  $\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{РК}}$  и  $\beta_{2\text{эф}}$ , а также значения их величин на уровнях варьирования РОЦКП:

$$x_7 = \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{РК}} = 1...1,7 (1; 1,226; 1,35; 1,474; 1,7);$$

$$x_8 = \beta_{2\text{эф}} = 15...40^\circ (15; 23,08; 27,5; 31,92; 40).$$

### 9. Диапазоны и уровни варьирования конструктивно-геометрическими факторами СА и РК одноступенчатой ЦБТСММ

В данном разделе рассмотрена проблема варьирования факторами  $\alpha_{1\text{эф}}$ ,  $\bar{\delta}_{\text{кр СА}}$ ,

$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{СА}}$ ,  $\left(\frac{b}{t_{\text{сп}}}\right)_{\text{РК}}$ ,  $\bar{D}$ ,  $\beta_{2\text{эф}}$  и  $\bar{F}_{\text{РК}}$  одноступенчатой ЦБТСММ при планировании эксперимента.

Рабочий процесс турбин этого типа наименее исследован. Поэтому при планировании эксперимента приходится опираться не только на проверенные экспериментальные данные, но и на умозаключения относительно степени влияния некоторых факторов.

Каналы СА в ЦБТСММ могут выполняться конфузорными (рис. 4,а) или в форме сопла Лавалья (рис. 4,б) соответственно при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях потока на выходе из СА. Как правило, эти ка-

налы образуются с помощью профилированных лопаток.

Угол  $\alpha_{1\phi}$  в ЦБТСММ определяется следующим образом:

$$\alpha_{1\phi} = \arcsin \frac{a_{zCA} (1 + \bar{\delta}_{кр}) z_{CA}^{\varepsilon-1}}{D_1 \pi (1 - 2\bar{\delta}_r)}. \quad (15)$$

Величина  $\bar{\delta}_r = 0,005 \dots 0,01$  как и в ЦСТСММ.

С другой стороны:

$$\sin \alpha_{1\phi} = \frac{a_{zCA} (1 + \bar{\delta}_{кр})}{D_1} \cdot \left(\frac{b}{t}\right)_{CA} \left(\frac{h}{b}\right)_{CA} \left(\frac{h_{CA}}{D_1}\right)^{-1}.$$

В настоящее время влияние параметра  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA}$  на эффективность ЦБТСММ не изучено. Но поскольку криволинейная форма образующих лопаток СА ЦБТСММ должна оказывать воздействие на кривизну линий тока подобно СА ОТСММ, можно предположить, что в ЦБТСММ также имеется не-

кое оптимальное по КПД значение  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA\text{opt}}$ .

Учитывая принятое равенство параметров  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA}$  и  $\left(\frac{b}{t}\right)_{ПК}$  в ОТСММ, с целью сокращения трудоёмкости проведения испытаний

полагаем и для ЦБТСММ  $\left(\frac{b}{t}\right)_{CA} = \left(\frac{b}{t}\right)_{ПК}$ .

Тогда диапазон варьирования фактором

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{CA} = \left(\frac{b}{t}\right)_{ПК} = 1,5 \dots 2,5 \quad [3].$$

Центробежные турбины характеризуются отношением  $\bar{D} > 1$  и совпадением действия центробежных инерционных сил с направлением потока, что вызывает его дополнительное ускорение. Поэтому величина приведённой скорости  $\lambda_{1s}$  в ЦБТСММ по сравнению с её значением в ОТСММ и ЦСТСММ при одинаковых  $Y_\tau$  и  $\pi_\tau$  будет наибольшей.

Как следствие, толщина пограничного слоя на образующих лопаток и выходных кромок будет наименьшей, а значит, следует ожидать существенного влияния толщины выходной кромки лопатки на КПД ЦБТСММ и крутого протекания зависимости  $\eta_e = f(\bar{\delta}_{крCA})$  в диапазоне характерных значений  $\bar{\delta}_{крCA} = 0,14 \dots 0,42$ . Таким образом, параметр  $\bar{\delta}_{крCA}$  обязательно нужно учитывать как варьируемый фактор эксперимента.

Как и в случаях с осевой и центростремительной турбиной, использовать параметр  $\frac{a_{zCA}}{D_1}$  как варьируемый фактор плана эксперимента невозможно. В работе [3] при  $D_1 = 32$  мм величина  $a_{zCA} = 1,42$  мм, поэтому принимаем начальное значение  $\frac{a_{zCA}}{D_1} = 0,044$ .

Однако эту величину следует корректировать для обеспечения целого числа  $z_{CA}^{\varepsilon-1}$ .

Было принято равенство диапазонов относительных шагов СА и РК

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{CA} = \left(\frac{b}{t}\right)_{ПК} = 1,5 \dots 2,5. \text{ Для рабочих колёс}$$

радиальных турбин характерным параметром, связанным с шагом решётки, обычно

является  $\left(\frac{b}{t_{cp}}\right)_{ПК}$ . Для сокращения числа влияющих факторов в качестве варьируемого

примем  $\left(\frac{b}{t}\right)_{ПК}$ . При этом определим такой

диапазон изменения значений параметра

$$\left(\frac{b}{t_{cp}}\right)_{ПК}, \text{ который бы обеспечивал рациональ-$$

ный диапазон значений фактора  $\bar{D}$ .

$$\text{Фактор } \left(\frac{b}{t_{cp}}\right)_{ПК} \text{ связан с факторами } \bar{D},$$

$\bar{D}_M$  и  $\beta_{2\phi}$  следующим соотношением:

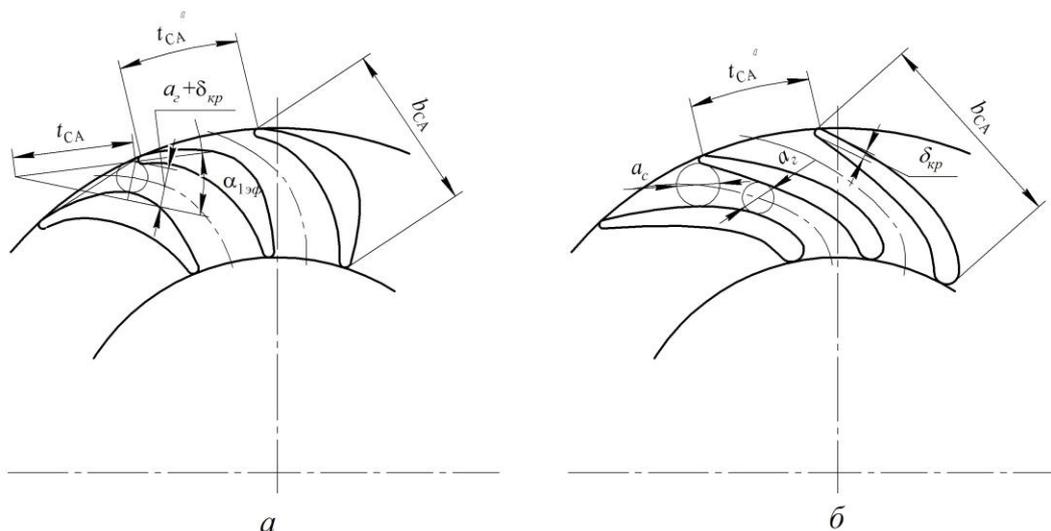


Рис. 4. Профили лопаток и межлопаточные каналы СА ЦБТСММ:  
 а) конфузорный канал, образованный дозвуковыми профилями;  
 б) канал в форме сопла Лаваля, образованный сверхзвуковыми профилями

$$\left( \frac{b}{t_{cp}} \right)_{PK} = \bar{D} \frac{\bar{D} - 1}{\bar{D} + 1} \cdot \frac{\bar{D}_M D_{1исп} \sin \beta_{2эф}}{a_{zPK}} \quad (16)$$

Величина  $\bar{D}$  в работе [3] оставалась фиксированной и была равна 1,56. По аналогии с диапазоном варьирования  $\bar{D} = 0,4 \dots 0,9$  у ЦСТСММ представляют интерес РК ЦБТСММ с  $\bar{D} = 1,1 \dots 2,5$  в контексте изучения влияния этого параметра на критерии оценки эффективности турбины, под которыми понимается совокупность энергетических (КПД, удельный расход рабочего тела), массогабаритных и технико-экономических показателей. Однако с помощью выражения (15) установлено, что выполнение условия сохранения значений  $a_{zPK} = 0,001 \dots 0,005$  м в процессе эксперимента без внесения в него существенных погрешностей возможно в диапазоне значений  $\bar{D} = 1,1 \dots 2,5$ . Ему соответствуют значения фактора  $\left( \frac{b}{t_{cp}} \right)_{PK} = 1 \dots 2,38$ .

В [3] значение величины  $\beta_{2эф} = 20^\circ$  принято во всех экспериментах. Однако по указывавшимся выше причинам имеет смысл изучить влияние этого фактора на критерии

оценки эффективности в некотором диапазоне его значений. Этот диапазон значений примем таким же, как в ОТСММ:  $15 \dots 40^\circ$ .

Как и в ЦСТСММ, в ЦБТСММ высота лопатки РК в меридиональной плоскости обычно изменяется. Но лопатка РК центробежной турбины не расширяется, а сужается к выходу из последней, что связано с соответствующим увеличением диаметра. Поскольку в турбине удельный объем рабочего тела увеличивается и для сохранения постоянства его расхода через турбину требуются увеличенные значения абсолютной скорости и (или) площади потока на выходе из неё по сравнению со входом, то степень уменьшения высоты лопатки от входа к выходу в РК ЦБТСММ должна быть меньше соответствующей степени увеличения высоты лопатки РК в ЦСТСММ. Исследованные ЦБТСММ имели  $\bar{h}_{PK} = 0,786$ . С точки зрения экономичности и технологичности изготовления представляют интерес лопатки с  $\bar{h}_{PK} = 0,667 \dots 1$ . Анализ матрицы РОЦКП показал, что данный диапазон значений реализуется в эксперименте при значениях варьируемого фактора  $\bar{F}_{PK} = 1,034 \dots 1,307$ .

Итак, принимаем следующие диапазоны варьирования конструктивно-геометри-

ческих факторов и значения их величин на уровнях варьирования РОЦКП:

$$x_4 = \alpha_{1\text{эф}} = 16 \dots 22^\circ (16^\circ; 17,94^\circ; 19^\circ; 20,06^\circ; 22^\circ);$$

$$x_6 = \bar{D} = 1,1 \dots 2 (1,1; 1,391; 1,55; 1,709; 2);$$

$$x_7 = \left( \frac{b}{t_1} \right)_{\text{ПК}} = 1,5 \dots 2,5 (1,5; 1,823; 2; 2,177; 2,5);$$

$$x_8 = \beta_{2\text{эф}} = 15 \dots 40^\circ (15^\circ; 23,08; 37,5; 31,92; 40^\circ);$$

$$x_9 = \bar{F}_{\text{ПК}} = 1,034 \dots 1,307 (1,034; 1,122; 1,17; 1,218; 1,307);$$

$$x_{11} = \bar{\delta}_{\text{кр СА}} = 0,14 \dots 0,42 (0,14; 0,231; 0,28; 0,329; 0,42).$$

### Заключение

Произведён выбор диапазонов варьирования конструктивно-геометрических и режимных факторов, а также конкретных значений величин этих факторов для планирования эксперимента с планами типа РОЦКП, необходимых для проведения обоснованных с технико-экономической точки зрения испытаний турбин трёх типов: ОТСММ, ЦСТСММ и ЦБТСММ. Проведение факторных экспериментов по разработанным планам минимизирует временные и материальные затраты на испытания ТСММ и обеспечивает возможность получения достоверных и обоснованных результатов в виде регрессионных зависимостей критериев оценки эффективности ТСММ от основных влияющих факторов в выбранных диапазонах их варьирования.

### Библиографический список

1. Григорьев, В.А. Планирование факторного эксперимента при испытаниях одноступенчатых турбин сверхмалой мощности / В.А. Григорьев, В.М.Радько, Д.С. Кала-

бухов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 6 (30).– С.

2. Наталевич, А.С. Воздушные микро-турбины / А.С. Наталевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.

3. Грачёва, С.М. Исследование особенностей рабочего процесса воздушной центробежной микро-турбины: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / С.М. Грачева.– Куйбышев: КуАИ, 1975.– 18 с.

4. Федосеев, В.В. Повышение эффективности рабочего процесса и совершенствование метода проектирования газовых микро-турбин: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / В.В. Федосеев.– Куйбышев: КуАИ, 1985. – 23 с.

5. Матвеев, В.Н. Выбор эффективного угла сопловой решётки парциальной центростремительной микро-турбины / В.Н. Матвеев, Н.Ф. Мусаткин // Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей.– Куйбышев: КуАИ. – 1990. – С. 82-86.

6. Матвеев, В.Н. Метод проектного расчёта многорежимных турбоприводов на базе центростремительных микро-турбин / В.Н.Матвеев // Вестник СГАУ. Серия: Проблемы и перспективы развития двигателестроения. - Выпуск 3, часть 2.– Самара.– 1999.– С. 14-19.

7. Матвеев, В.Н. Влияние толщины выходных кромок лопаток сопловой решётки на экономичность центростремительных микро-турбин / В.Н. Матвеев, Д.В. Сивиркин, Н.Т. Тихонов // Вестник СГАУ. Серия: Актуальные проблемы производства. Технология, организация, управление.– Самара: СГАУ.– 1995.– С. 22-26.

8. Матвеев, В.Н. Исследование возможности снижения густоты сопловой решётки парциальной центростремительной микро-турбины / В.Н. Матвеев, Е.Ю. Белоусов, А.В. Малышев // Вестник СГАУ. Серия: Проблемы и перспективы развития двигателестроения. - Выпуск 1, часть 1.– Самара.– 1998.– С. 56-59.

9. Тихонов, Н.Т. Влияние эффективно-го угла сопловой решётки на экономичность осевой микро-турбины с полным впуском /

Н.Т.Тихонов, Э.Э.Пфайфле // Изв. вузов. Авиационная техника.– Казань, 1989.– №1.– С.111-113.

10. Мусаткин, Н.Ф. Исследование влияния числа лопаток СА и РК осевой воздушной микротурбины на экономичность турбопривода / Н.Ф. Мусаткин, Н.Т. Тихонов, А.А. Трофимов // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Основные направления повышения технического уровня механизированного инструмента».– М., ВНИИСМИ.– 1976.

11. Матвеев, В.Н. Влияние густоты рабочей решётки на экономичность центробежных микротурбин с полным подводом рабочего тела / В.Н. Матвеев, Д.В. Сивиркин, Н.Т. Тихонов // Вестник СГАУ. Серия: Актуальные проблемы производства. Технология, организация, управление.– Самара: СГАУ.– 1998.– С. 63-66.

12. Тихонов, А.Н. Экспериментальное исследование влияния конструктивного угла выхода потока из рабочего колеса на экономичность воздушной центробежной микротурбины / А.Н. Тихонов, Н.Н. Калинина, Н.Т. Тихонов // Изв. вузов. Энергетика.– Казань, 1981.– №12.– С. 92-94.

13. Матвеев, В.Н. Выбор оптимальной величины соотношения высот лопаток на выходе и входе в закрытое рабочее колесо центробежной микротурбины / В.Н. Матвеев, Н.Ф. Мусаткин // Сб. научн. тр.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей.– Куйбышев, 1986.– С. 92-96.

14. Тихонов, Н.Т. Влияние угла атаки на экономичность и степени реактивности осевых микротурбин с полным впуском / Н.Т. Тихонов, Э.Э. Пфайфле // Изв. вузов. Авиационная техника. - Казань, 1989. - № 3. - С. 104-106.

## CHOISE OF THE RANGE AND LEVELS OF VARYING THE FACTORS OF THE EXPERIMENT PLAN FOR TESTING SINGLE-STAGE ULTRALOW POWER TURBINE

© 2011 V. A. Grigoryev, V. M. Radko, D. S. Kalabukhov

Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

The experiment center and the steps of varying the factors of the experimental design to test ultralow power turbines (ULPT) centripetal (CPULPT), axial (AULPT) and centrifugal (CFULPT) types are defined. The rational ranges of varying these factors in terms of rotatable orthogonal central composition plan (ROCCP) feasibility, as well as the values that take factors at the appropriate levels of variation are also defined.

*Design of experiment, ranges of variation, levels of variation, value, regime factors, single-stage ultralow power turbine, performance measures.*

### Информация об авторах

**Григорьев Владимир Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: grig@ssau.ru. Область научных интересов: испытание авиационных двигателей, начальное проектирование газотурбинных двигателей.

**Радько Владислав Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет).

E-mail: radko@ssau.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в турбинах сверхмалой мощности.

**Калабухов Дмитрий Сергеевич**, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет. E-mail: stream\_dk@mail.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в турбинах сверхмалой мощности.

**Grigoryev Vladimir Alexeevitch**, doctor of technical sciences, professor of the aircraft engine theory department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: grig@ssau.ru. Area of research: choice of parameters and design of small gas turbine engines.

**Radko Vladislav Mikhailovitch**, candidate of technical sciences, associate professor of the aircraft engine theory department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: radko@ssau.ru. Area of research: working processes in ultralow power turbines.

**Kalabukhov Dmitriy Sergeevitch**, post-graduate student of the aircraft engine theory department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: stream\_dk@mail.ru. Area of research: working processes in ultralow power turbines.