

УДК 621.438.001 2 (02)

В. А. ГРИГОРЬЕВ, В. М. РАДЬКО, Д. С. КАЛАБУХОВ

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), Россия

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОРАЗМЕРНЫХ ТУРБИН ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Описаны особенности эксплуатации малоразмерных турбин сверхмалой мощности, развивающие мощность на валу не более 10 кВт. Показано, что малоразмерность таких турбин и многорежимность их функционирования обуславливает необходимость проведения натурального эксперимента для построения характеристик турбин сверхмалой мощности. Дано описание объекта экспериментальных исследований – парциальной одноступенчатой осевой турбины сверхмалой мощности. Приведен двухфакторный план эксперимента. Рассмотрены основные способы представления характеристик малоразмерных турбин, их достоинства и недостатки. Построены зависимости КПД, мощности и крутящего момента испытанной турбины от режимных параметров и параметров подобия. Обоснована целесообразность представления характеристик как зависимости мощностного КПД от коэффициента комплексной мощности и режимных параметров Y_T и π_T .

Ключевые слова: малоразмерная турбина, турбина сверхмалой мощности, характеристика, план эксперимента, коэффициент комплексной мощности.

Введение

В авиационной и космической технике турбины используются не только в составе ГТД, но также в системах запуска (воздушные стартеры и турбостартеры) и вспомогательных энергетических установках. Такие турбины называются малоразмерными и характеризуются мощностью на валу $N_T \leq 500$ кВт и расходом рабочего тела $G \leq 2 \dots 3$ кг/с. В энергоузлах космических установок находят применение особый класс турбин сверхмалой мощности (ТСММ) [1] с $N_T = 0,01 \dots 10$ кВт и $G \leq 0,1$ кг/с. Для решения практических задач, связанных с выбором параметров расчетного режима энергетической установки (ЭУ) и его турбины с учетом эксплуатации на нерасчетных режимах, необходимо наличие характеристик турбин, представленных в универсальном виде [2]. Однако способы представления характеристик таких турбин в научно-технической литературе практически не рассматривались, в то время как варианты представления характеристик турбин авиационных ГТД описаны достаточно хорошо [3]. В данной работе предложены и проанализированы наиболее информативные способы представления характеристик, которые были построены на основе обработки данных экспериментальных исследований осевой ТСММ.

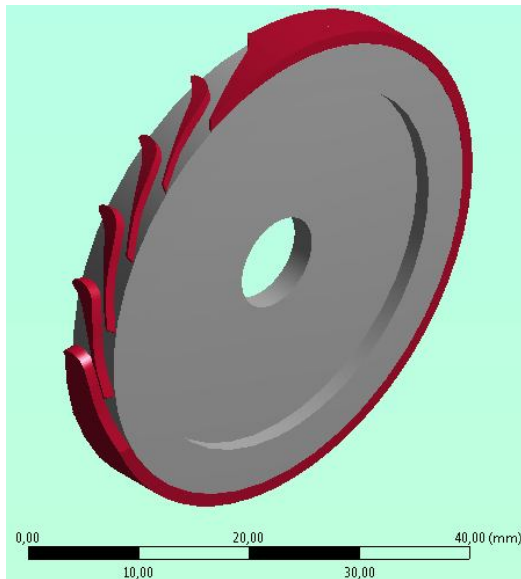
Одной из особенностей эксплуатации турбин сверхмалой мощности является их многорежимное функционирование в процессе работы турбоагрегата [3]. При переходе с одного режима работы на другой параметр нагруженности $Y_T = u/c_{1s}$ может изме-

няться в диапазоне $0,1 \dots 0,4$. Степень понижения давления π_T обычно выдерживается постоянной путем поддержания требуемого давления $p_{вх}^*$ на входе в турбоагрегат в зависимости от сложившегося давления среды на выходе из турбоагрегата $p_{вых}$. Для нормального функционирования некоторых турбоагрегатов требуется применение особых законов управления расходом рабочего тела, что достигается изменением π_T в течение периода функционирования агрегата. При использовании одноступенчатых осевых турбин $p_{вх}^*$ может изменяться более чем в 5 раз [1], поэтому обычно величина $\pi_T = 1,5 \dots 5$.

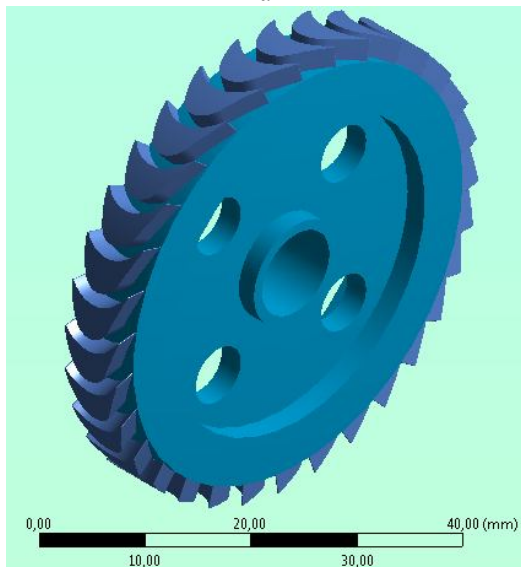
Многорежимность работы турбины определяет высокие требования к расчету и представлению характеристик ТСММ, поскольку от их качества во многом зависит эффективность энергоузла, в котором используется турбоагрегат. Существуют экспериментальные, расчетные и расчетно-экспериментальные методы построения характеристик турбин [2]. В случае ТСММ наиболее целесообразно использование натурального эксперимента, что обусловлено особенностями рабочего процесса в таких турбинах, которые трудно поддаются достоверному аналитическому разрешению [4].

Объект исследований и план эксперимента

Построение характеристик осевой турбины, (рис. 1) осуществлялось по результатам натуральных экспериментов на автоматизированном магнетовоздушном тормозном стенде [5]. Основные параметры



а



б

Рис. 1. Геометрические модели соплового аппарата и рабочего колеса исследуемой турбины: а – СА; б – РК

испытуемой турбины типичны для ТСММ: средний диаметр $D_{cp} = 46$ мм, высота лопатки соплового аппарата (СА) $h_{CA} = 1,25$ мм, высота лопатки рабочего колеса (РК) $h_{PK} = 2,25$ мм, относительные удлинения венцов $(s/h)_{CA} = 4,1$ и $(s/h)_{PK} = 3,1$. Подвод рабочего тела к турбине парциальный, степень парциальности $\varepsilon = 0,25$. Осевой зазор между СА и РК равнялся 0,6 мм, а радиальный зазор на номинальном режиме работы составлял 0,3 мм.

Турбина используется в составе турбопривода генератора. В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий из резервуара. Подвод газа выполнен по схеме истечения из резервуара ограниченного объема, т.е. с переменным расходом воздуха в течение времени функционирования

$\tau = 5$ с. Расчетному режиму соответствуют значения $Y_{T,p} = 0,2$ и $\pi_{T,p} = 5$. При этом в процессе ее работы Y_T варьируется от 0,1 до 0,3, а $\pi_T = 1,5 \dots 5$.

С целью построения экспериментальных характеристик на нерасчетных режимах был разработан двухфакторный план эксперимента типа 4^2 , приведенный в табл. 1. В каждом опыте плана варьировалась пара режимных факторов – частота вращения ротора n и давление заторможенного потока перед турбиной p_{0}^* , а число уровней варьирования равнялось четырем. Значение давления p_{0}^* задавалось таким, чтобы обеспечить требуемое по плану значение π_T в пределах погрешности измерения $p_{0изб}^*$ и p_H . Режимные факторы π_T и Y_T рассчитывались для каждого опыта автоматически с помощью программы, разработанной авторами в среде LabVIEW.

Таблица 1

План натурального эксперимента

Варьируемые факторы		Y_T	π_T
$n, \text{мин}^{-1}$	$p_{0}^*, \text{кПа}$		
21000	150	0,198	1,5
	265	0,133	2,67
	385	0,116	3,84
	500	0,108	5
35000	150	0,33	1,5
	265	0,221	2,67
	385	0,193	3,84
	500	0,18	5
49000	150	0,463	1,5
	265	0,309	2,67
	385	0,275	3,84
	500	0,255	5

Построение характеристик турбины сверхмалой мощности по результатам эксперимента

Известно, что в процессе работы турбины возможно изменение независимых определяющих параметров p_{0}^* , температуры заторможенного потока T_{0}^* , расхода газа G и давления за турбиной p_2 , которое приводит к смене режима работы и к изменению определяемых выходных параметров турбины: частоты вращения ротора n , крутящего момента $M_{кр}$, мощности на валу $N_T = M_{кр}\pi n/30$ и мощностного КПД $\eta_T = N_T / L_{TS} G_v$ [6].

Поскольку при испытании турбины выдержать все параметры рабочего режима на требуемом уровне невозможно, то характеристики турбины обычно представляют в функции безразмерных комплексов отдельных параметров.

Зачастую характеристики строятся по приведенным к САУ параметрам, чтобы иметь возможность сравнить результаты испытаний турбин в различных атмосферных условиях. Приведенный крутящий момент $M_{кр пр}$ и мощность $N_{т пр}$ представляют собой комплексы $\frac{101325 N_T}{P_H}$ и $\frac{101325 N_T}{P_H} \sqrt{\frac{288}{P_H}}$ соответственно, а приведенная частота вращения $n_{пр} = n \sqrt{\frac{288}{T_H}}$. При испытаниях в лаборатории температура на входе в турбину $T_0^* = T_{п}^*$.

Распространен подход к построению характеристик в виде зависимостей критериев или параметров подобия рабочего процесса [6].

Известны следующие способы представления характеристик малоразмерных турбин:

- 1) $M_{кр пр} = f(Y_T, \pi_T)$, $N_{т пр} = f(Y_T, \pi_T)$ и $\eta_T = f(Y_T, \pi_T)$;
- 2) $M_{кр пр} = f(\pi_T, n_{пр})$, $N_{т пр} = f(\pi_T, n_{пр})$ и $\eta_T = f(\pi_T, n_{пр})$;

$$3) \frac{M_{кр пр}}{P_0^*} = f\left(\pi_T, \frac{n}{\sqrt{T_0^*}}\right), \frac{N_{т пр}}{P_0^* \sqrt{T_0^*}} = f\left(\pi_T, \frac{n}{\sqrt{T_0^*}}\right) \text{ и}$$

$$\eta_T = f\left(\pi_T, \frac{n}{\sqrt{T_0^*}}\right).$$

На рис. 2 показаны характеристики в виде функции приведенных параметров от π_T и Y_T . Характеристики, представленные в таком виде, наглядно демонстрируют особенности их протекания в зависимости от режима работы малоразмерной турбины. Из рис. 2, а, б видно, что в процессе функционирования турбина работает на «левой» ветви характеристики, а оптимальная величина $Y_{T opt} = 0,32$ достигается при низком значении $\pi_T = 1,5$. Рис. 2, б иллюстрирует убывание $M_{кр}$ с увеличением Y_T и уменьшением π_T , весьма близкое к линейному, что хорошо согласуется с теоретическими данными о рабочем процессе турбин. Указанный способ представления характеристик ТСММ довольно распространен на практике, но он несвободен от недостатков. Во-первых, даже в широком диапазоне значений π_T кривые на характеристике $\eta_T = f(Y_T, \pi_T)$ расползены близко друг к другу, что затрудняет визуальное восприятие и анализ зависимости. Во-вторых, при планировании эксперимента с варьируемой частотой вращения n вместо параметра Y_T (что упрощает процесс проведения эксперимента) кривые $\pi_T = const$ лежат в различных диапазонах изменения Y_T , уменьшающихся с увеличением π_T . Из рис. 2 видно, что в области $Y_T = 0,28 \dots 0,35$ сравнение характеристик при $\pi_T = 1,5$ и $\pi_T > 3,8$ без экстраполяции провести невозможно.

Второй способ представления характеристик в функции $\pi_T, n_{пр}$ (рис. 3) более информативен при обработке результатов двухфакторного эксперимента с варьируемыми факторами π_T и n .

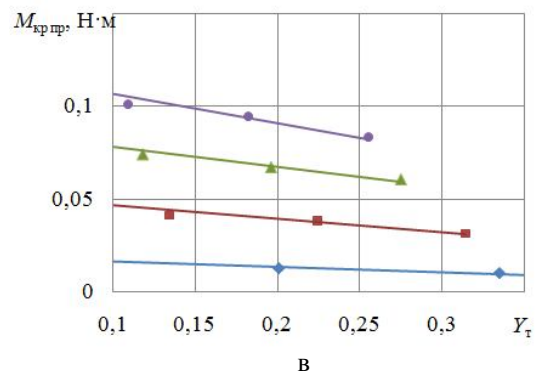
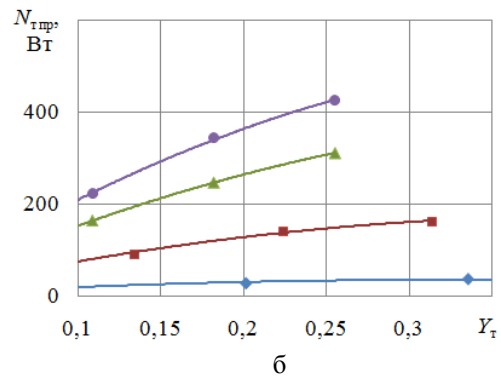
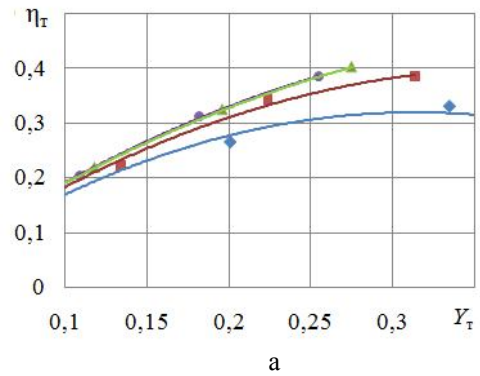


Рис. 2. Характеристика малоразмерной турбины в функции режимных параметров:

- а – $\eta_T = f(Y_T, \pi_T)$;
 б – $N_{т пр} = f(Y_T, \pi_T)$; в – $M_{кр пр} = f(Y_T, \pi_T)$;
 ● – $\pi_T = 5$; ▲ – $\pi_T = 3,85$; ■ – $\pi_T = 2,65$;
 ◆ – $\pi_T = 1,5$

Характеристика $\eta_T = f(\pi_T, n_{пр})$ свидетельствует о сильной зависимости мощностного КПД малоразмерной турбины не только от частоты вращения, но и от степени понижения давления. При этом с ростом n и, как следствие, увеличением Y_T характер протекания этой зависимости меняется на противоположный. Увеличение η_T с ростом π_T при $n = 4900 \text{ мин}^{-1}$ объясняется ростом работоспособности рабочего тела, что уменьшает краевые и вентиляционные потери в парциальной турбине [4].

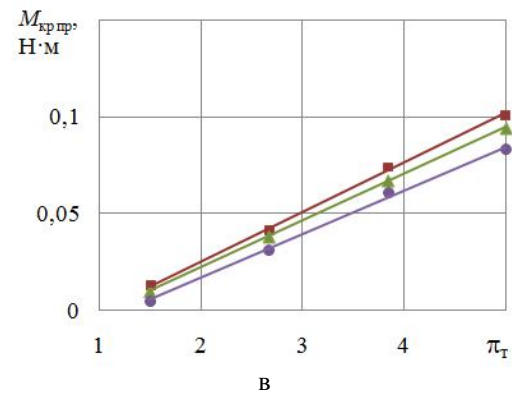
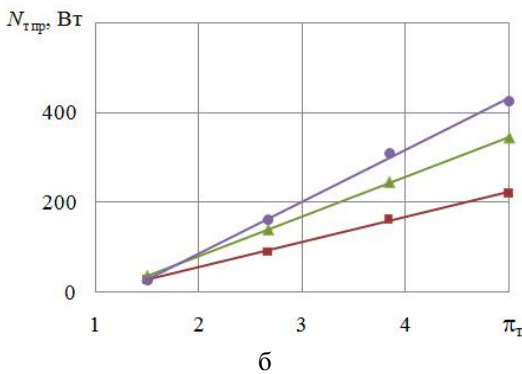
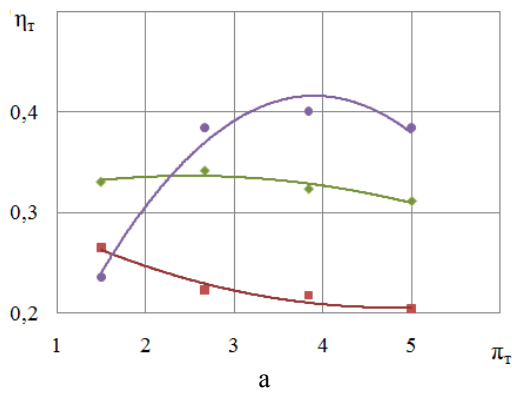


Рис. 3. Представление характеристики малоразмерной турбины в функции параметров π_T и $n_{пр}$:
 а – $\eta_T = f(\pi_T, n_{пр})$; б – $N_{T пр} = f(\pi_T, n_{пр})$;
 в – $M_{кр пр} = f(\pi_T, n_{пр})$:
 — $n_{пр} = 49000 \text{ мин}^{-1}$; — $n_{пр} = 35000 \text{ мин}^{-1}$;
 — $n_{пр} = 21000 \text{ мин}^{-1}$

Указанный способ представления характеристик удобен также возможностью линейной аппроксимации экспериментальных зависимостей $N_{T пр}$ и $M_{кр пр}$ от π_T , что позволяет построить их в условиях наличия всего двух экспериментальных точек по π_T . К недостаткам способа можно отнести отсутствие отражения влияния изменения давления рабочего тела p_0^* и его температуры T_0^* в процессе проведения эксперимента на характеристики турбины.

Указанного недостатка лишен третий способ представления характеристик как функции параметров подобия от параметров режима (рис. 4).

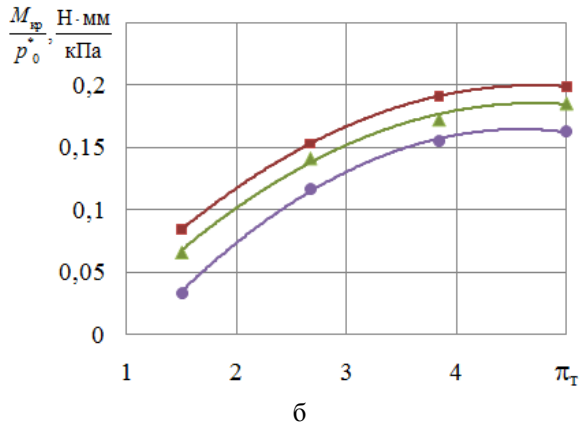
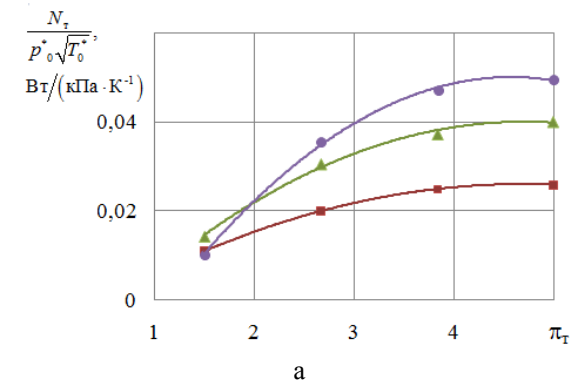


Рис. 4. Представление характеристики малоразмерной турбины в виде зависимостей параметров подобия:

$$\begin{aligned}
 \text{а} - \frac{N_T}{p_0^* \sqrt{T_0^*}} &= f\left(\pi_T, \frac{n}{\sqrt{T_0^*}}\right); \quad \text{б} - \frac{M_{кр пр}}{p_0^*} = f\left(\pi_T, \frac{n}{\sqrt{T_0^*}}\right) \\
 \text{— } n_{пр} &= 49000 \text{ мин}^{-1}; \quad \text{— } n_{пр} = 35000 \text{ мин}^{-1}; \\
 \text{— } n_{пр} &= 21000 \text{ мин}^{-1}
 \end{aligned}$$

$$\text{Зависимости } \eta_T = f\left(\pi_T, \frac{n}{\sqrt{T_0^*}}\right) \text{ и } \eta_T = f(\pi_T, n_{пр})$$

тождественны друг другу. Зависимости

$$\frac{M_{кр пр}}{p_0^*} = f\left(\pi_T, \frac{n}{\sqrt{T_0^*}}\right) \text{ и } \frac{N_T}{p_0^* \sqrt{T_0^*}} = f\left(\pi_T, \frac{n}{\sqrt{T_0^*}}\right), \text{ в отличие от } M_{кр пр} = f(\pi_T, n_{пр}) \text{ и } N_{T пр} = f(\pi_T, n_{пр}), \text{ нелинейные и близки к квадратичным.}$$

Данный факт объясняется неодинаковым влиянием изменения p_0^* на работу турбины и расход рабочего тела, величины которых определяют мощность и крутящий момент на валу турбины: с увеличением p_0^* и π_T при $p_2 = \text{const}$ работа возрастает менее интенсивно, чем линейно возрастающий расход газа, что обуславливает

наличие оптимума по π_T для параметров $\frac{M_{кр пр}}{p_0^*}$ и

$$\frac{N_T}{p_0^* \sqrt{T_0^*}}.$$

В работе [7] показано, что из основных параметров турбины, задаваемых в качестве исходных данных для её расчета можно сформировать критериальный комплекс в виде коэффициента комплекс-

$$\text{ной мощности } \bar{N}_{\text{компл}} = \frac{N_T}{p^*_0 \sqrt{T_0^*}} \left(\frac{n}{\sqrt{T_0^*}} \right)^2.$$

Этот коэффициент используется при построении и анализе характеристик малоразмерных турбин. У класса турбин сверхмалой мощности величина $\bar{N}_{\text{компл}}$

$$\text{варьируется от } 10 \text{ до } 5000 \frac{\text{Вт}}{\text{Па}\sqrt{\text{К}}} \left(\frac{\text{мин}^{-1}}{\sqrt{\text{К}}} \right)^2 \text{ [4]. Ко-}$$

эффициент $\bar{N}_{\text{компл}}$ связывает между собой производительность турбины, термодинамические параметры потока, режимные параметры Y_T и π_T и мощностной КПД η_T . Таким образом, использование этого параметра совместно с Y_T или π_T однозначно определяет η_T , N_T и $M_{кр}$ турбины заданной геометрии и позволяет задать характеристику в виде зависимости $\eta_T = f(\bar{N}_{\text{компл}}, Y_T)$ или $\eta_T = f(\bar{N}_{\text{компл}}, \pi_T)$. На рис. 5 показан пример таких характеристик для исследуемой ТСММ.

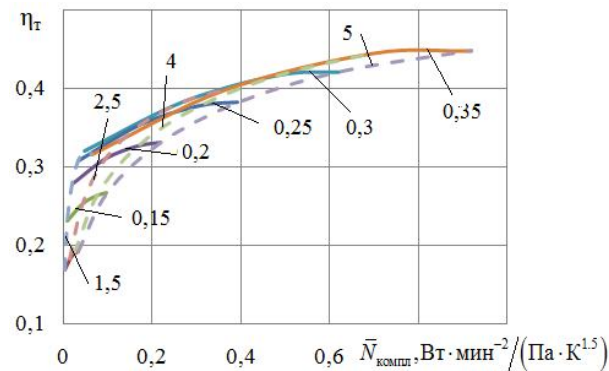


Рис. 5. Совмещенная характеристика

$$\eta_T = f(\bar{N}_{\text{компл}}):$$

— $Y_T = \text{const}$; - - - $\pi_T = \text{const}$

Применение этих зависимостей на совмещенной характеристике позволяет определить η_T и ряд других параметров, входящих в коэффициент $\bar{N}_{\text{компл}}$ при отклонении значения одного из параметров от расчетного. Приведем два примера задач, для решения которых могут использоваться такие характеристики.

Задача 1. Определить мощность и частоту вращения ротора турбины известной геометрии для заданных значений Y_T и π_T в сложившихся атмосферных условиях p_n и T_n .

Решение задачи:

1. На совмещенной характеристике графически интерполируются кривые $Y_T = \text{const}$ и $\pi_T = \text{const}$ под заданные значения этих параметров.

2. Определяется значение параметра

$$\frac{n}{\sqrt{T_0^*}} = \frac{60 Y_T \sqrt{\frac{2k}{k-1} R \left(1 - \pi_T^k \right)}}{\pi D_{\text{ср}}}.$$

3. Находится точка пересечения кривых $Y_T = \text{const}$ и $\pi_T = \text{const}$ и по графику определяется величина η_T и $\bar{N}_{\text{компл}}$.

4. По найденным значениям $\frac{n}{\sqrt{T_0^*}}$ и

$$\bar{N}_{\text{компл}}$$
 определяется параметр подобия $\frac{N_T}{p^*_0 \sqrt{T_0^*}}$.

5. С учетом того, что $p^*_0 = p_n$, π_T , а $T_n = T_0^*$ по найденным значениям параметров подобия $\frac{N_T}{p^*_0 \sqrt{T_0^*}}$

и $\frac{n}{\sqrt{T_0^*}}$ определяется мощность турбины N_T и ее

частота вращения n .

Задача 2. По заданной мощности, частоте вращения ротора турбины, параметрам рабочего тела p^*_0 и T_0^* и атмосферным условиям найти мощностной КПД турбины η_T и ее средний диаметр.

1. Из условий задачи следует, что по заданным параметрам можно определить коэффициент $\bar{N}_{\text{компл}}$ и π_T .

2. На совмещенной характеристике интерполируется кривая $\pi_T = \text{const}$, затем на ней находится точка, соответствующая найденным π_T и $\bar{N}_{\text{компл}}$, и определяется η_T .

3. Интерполируется кривая $Y_T = \text{const}$ так, чтобы она пересекала кривую $\pi_T = \text{const}$ в обозначенной точке и определяется приближительное значение Y_T .

4. Определяется средний диаметр по формуле

$$D_{\text{ср}} = \frac{60 Y_T \sqrt{\frac{2k}{k-1} R T_0^* \left(1 - \pi_T^k \right)}}{\pi n}.$$

Отметим, что характеристика, изображенная на рис. 5, справедлива для турбины с $\varepsilon = 0,25$ и с определенными геометрическими соотношениями $h_{CA}/D_{\text{ср}}$, $(s/h)_{CA}$, $(s/h)_{PK}$ и т.д., т.е. не является универсальной. Однако ее можно применять для типоразмера $D_{\text{ср}} = 50 \dots 100$ мм, т.е. при условии сохранения геометрического подобия с изменением масштабности.

Заключение

В работе рассмотрены основные способы представления характеристик турбин сверхмалой мощности, применимые для всего класса малоразмерных турбин. Анализ различных способов представления характеристик показал, что они обладают различной информативностью. Наиболее полно взаимосвязь газодинамических и режимных факторов отражают

характеристики вида $\frac{M_{кр}}{P_0^*} = f\left(\pi_T, \frac{n}{\sqrt{T_0^*}}\right)$,

$$\frac{N_T}{P_0^* \sqrt{T_0^*}} = f\left(\pi_T, \frac{n}{\sqrt{T_0^*}}\right) \text{ и } \eta_T = f\left(\pi_T, \frac{n}{\sqrt{T_0^*}}\right).$$

Эффективным способом представления характеристик ТСММ является совмещение зависимостей мощностного КПД от коэффициента комплексной мощности при различных $Y_T = \text{const}$ и $\pi_T = \text{const}$ на одном графике. Это позволяет определить выходные параметры турбины на нерасчетных режимах при известных величинах Y_T и π_T или решить обратную задачу с целью нахождения параметров, задающих рассматриваемый режим работы турбины.

Литература

1. Калабухов, Д. С. Оптимальное проектирование турбин сверхмалой мощности в системе турбопривода [Текст] / Д. С. Калабухов, В. А. Григорьев, В. М. Радько / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – Самара, 2014. – Вып. 5(47), Ч. 2. – С. 189-200.
2. Нечаев, Ю. Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров. – М. : Машиностроение, 1977. – Ч. 1. – 312 с.
3. Григорьев, В. А. Методы обобщения и представления характеристик турбин авиационных ГТД [Текст] / В. А. Григорьев, Д. С. Калабухов, В. М. Радько // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 8 (115). – С. 66-72.
4. Наталевич, А. С. Воздушные микротурбины. [Текст] / А. С. Наталевич. – М. : Машиностроение, 1983. – 192 с.
5. Матвеев, В. Н. Модернизация стенда для исследования микротурбинных приводов [Текст] / В. Н. Матвеев, Л. С. Шаблий // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – Самара, 2011. – Вып. 3(27), Ч. 4. – С. 234-243.
6. Локай, В. И. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов. Теория, конструкция и расчет [Текст] / В. И. Локай, М. К. Максимова, В. А. Стрункин. – М. : Машиностроение, 1991. – 512 с.
7. Быков, Н. Н. Выбор параметров и расчет маломощных турбин для привода агрегатов. [Текст] / Н. Н. Быков, О. Н. Емин. – М. : Машиностроение, 1972. – 228 с.

Поступила в редакцию 01.06.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. П. Данильченко, главный конструктор ОАО «Кузнецов», Самара.

ПОДАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОРОЗМІРНИХ ТУРБІН ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

В. О. Григор'єв, В. М. Радько, Д. С. Калабухов

Описано особливості експлуатації малорозмірних турбін надмалої потужності, що розвивають потужність на валу не більше 10 кВт. Показано, що малорозмірність таких турбін і многорежимність їх функціонування обумовлює необхідність проведення натурного експерименту для побудови характеристик турбін надмалої потужності. Дано опис об'єкта експериментальних досліджень - парціальної одноступінчатої осьової турбіни надмалої потужності. Наведено двофакторний план експерименту. Розглянуто основні способи подання характеристик малорозмірних турбін, їх переваги і недоліки. Побудовано залежності ККД, потужності й крутного моменту випробуваної турбіни від режимних параметрів і параметрів подоби. Обґрунтовано доцільність подання характеристик як залежності потужного ККД від коефіцієнта комплексної потужності і режимних параметрів Y_T і π_T .

Ключові слова: малорозмірна турбіна, турбіна надмалої потужності, характеристика, план експерименту, коефіцієнт комплексної потужності.

**REPRESENTATION OF THE SMALL-SIZE POWER
PLANTS TURBINES CHARACTERISTICS***V. A. Grigoriev, V. M. Rad'ko, D. S. Kalabuhov*

The features of small ultra low power turbines operation which develop shaft power up to 10 kW are described. It is shown that small turbines and those of multi-mode operation causes needs for full-scale experiment to build ultra low power turbines performance. A description of the experimental object-governmental research - partial single-stage ultra low power axial turbine is given. Two-factor experimental design is given. The main ways of representing the characteristics of small turbines, their advantages and disadvantages discussed. Dependencies on the efficiency, power and torque of the tested turbines on the regime parameters and similarity parameters are constructed. Expediency presentation features such as horsepower, depending on the coefficient of efficiency of the integrated power and operational parameters, π_t and Y_t justified.

Keywords: small-sized turbine, ultra low power turbine characteristics, experimental design, power factor complex.

Григорьев Владимир Алексеевич – д-р техн. наук, проф. каф. теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, РФ, e-mail: va_grig@ssau.ru.

Радько Владислав Михайлович – канд. техн. наук, доц. каф. теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, РФ, e-mail: radko@ssau.ru.

Калабухов Дмитрий Сергеевич – канд. техн. наук, асс. каф. теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, РФ, e-mail: dskalabuhov@gmail.com.