



УДК 621.515.001.5

© С. В. Чехранов, 2013

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН С ЧАСТИЧНЫМ ОБЛОПАЧИВАНИЕМ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

Чехранов С. В. - д-р техн. наук, проф. кафедры «Судовые энергетические установки», тел. (423) 244-22-37, e-mail: turboroom@yandex.ru (Дальрыбвтуз)

Представлены экспериментальные характеристики осевых малорасходных турбин с частичным облопачиванием рабочего колеса в достаточно широком диапазоне геометрических и режимных параметров. Определено влияние величины степени парциальности таких турбин на их эффективность.

The experimental characteristics of axial low consumable turbines with partially vaned of impeller are presented in this article with a wide range of geometric and mode parameters. The influence of partialness of such turbines on their efficiency is determined.

Ключевые слова: малорасходные турбины, степень парциальности, частичное облопачивание рабочего колеса.

Малорасходные турбины (МРТ) очень широко используются в самых различных областях техники. При этом непрерывно происходит их совершенствование и к настоящему времени существует большое количество конструкций МРТ, отвечающие самым различным эксплуатационным требованиям.

Именно большое конструктивное разнообразие МРТ нередко вызывает вопрос о целесообразности новых экспериментальных исследований, поскольку любые эксперименты с натурными, и даже, модельными установками достаточно дороги. Тем более, что существует немало компьютерных программ, позволяющих решать сложные задачи аэродинамики турбомашин в трехмерной постановке и, даже, с учетом отрывных явлений.

Однако, опыт использования таких программ показывает, что они эффективны на стадии доводки элементов турбины. А вот на стадии создания новых конструкций эксперимент необходим, поскольку на его базе формируется надежная математическая модель, являющаяся основой инженерной методики, с помощью которой и проектируются турбины нового конструктивного ряда. Окончательную доводку геометрии проточной части турбины тогда уже можно производить с по-

мощью известных программных продуктов для решения трехмерных аэродинамических задач, таких как, например, ANSYS.

Поэтому экспериментальное исследование турбин с частичным облопачиванием рабочего колеса [1] представляет собой актуальную задачу, особенно с точки зрения накопления базы данных по МРТ с целью их дальнейшего совершенствования уже методами численного эксперимента. В данной статье представлены результаты исследования осевых двухступенчатых МРТ с частичным облопачиванием РК. Конструкция такой турбины представлена на рис. 1.

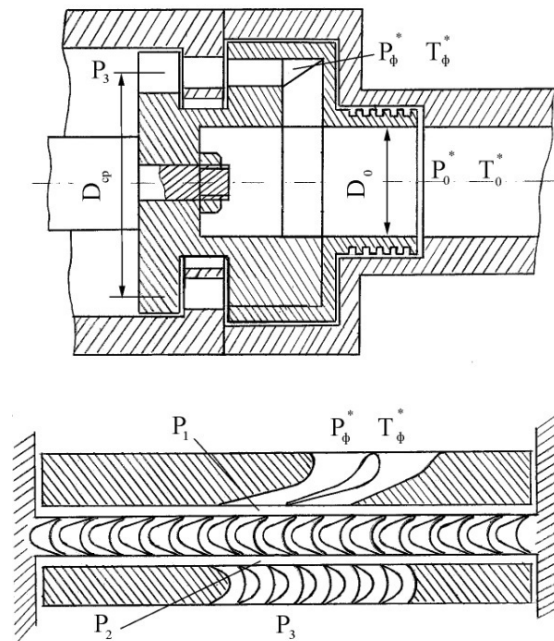


Рис. 1. Конструктивная схема осевой двухступенчатой МРТ с частичным облопачиванием рабочего колеса

Специфика конструкции малорасходных турбин с частичным облопачиванием РК выражается, прежде всего в двух моментах: отсутствии одного лопаточного аппарата и разных оптимальных значений U/C_0 для ВСА и для РК. Действительно, ВСА, представляющий собой в сущности Сегнерово колесо, в самостоятельном варианте имеет максимум к.п.д. при $U/C_0 \rightarrow 1$. Рабочее колесо с профилями обычного активного типа имеет максимум к.п.д. при значительно меньших величинах U/C_0 . Их совместная работа на одном валу во многом зависит от полноты использования выходной энергии потока, потерь от ВСА, соответствия треугольников скоростей геометрии профилей и т.п.

В целом было испытано 12 воздушных МРТ при π_T от 1,5 до 4,0. Геометрические характеристики турбин представлены в таблице.



Таблица

Угол установки сопел β_{1r}	Высота сопла L_c мм	Ширина горла $a_{мин}$ мм	Ширина сопла на вых. $a_{вых}$ мм	Шаг сопел t_c мм	Z_c	Угол входа в НА β_1	Угол выхода из НА β_2	Высота НА $L_{НА}$ мм
12	4.53	2.46	2.84	14.4	7	16	16	5.44
	4.53	2.46	2.84	14.4		16	16	5.44
	4.53	2.46	2.84	14.4		16	16	5.44
	4.53	2.46	2.84	14.4		16	16	5.44
16	3.41	2.54	2.93	11.2	9	21	21	4.10
	3.41	2.54	2.93	11.2		21	21	4.10
	3.41	2.54	2.93	11.2		21	21	4.10
	3.41	2.54	2.93	11.2		21	21	4.10
20	2.75	2.58	2.98	9.14	11	26	26	3.30
	2.75	2.58	2.98	9.14		26	26	3.30
	2.75	2.58	2.98	9.14		26	26	3.30
	2.75	2.58	2.98	9.14		26	26	3.30
Ширина канала $a_{НА}$ мм	Шаг НА $t_{НА}$ мм	$Z_{НА}$	Угол входа в РК $\beta_{вх}$	Угол выхода из РК $\beta_{зг}$	Высота РК $L_{РК}$ мм	Ширина канала $a_{РК}$ мм	Шаг РК $t_{РК}$ мм	$Z_{РК}$
1.58	6.28	6	23	23	6.53	1.49	4.19	24
1.58	6.28	6	23	23	6.53	1.49	4.19	
1.58	6.28	6	23	23	6.53	1.49	4.19	
1.58	6.28	16	23	23	6.53	1.49	4.19	
2.10	6.28	16	30	30	4.92	1.94	4.19	24
2.10	6.28	16	30	30	4.92	1.94	4.19	
2.10	6.28	16	30	30	4.92	1.94	4.19	
2.10	6.28	16	30	30	4.92	1.94	4.19	
2.60	6.28	16	35	35	3.96	2.25	4.19	24
2.60	6.28	6	35	35	3.96	2.25	4.19	
2.60	6.28	16	35	35	3.96	2.25	4.19	
2.60	6.28	6	35	35	3.96	2.25	4.19	

Как уже отмечалось, геометрический угол наклона сопел выбирался в диапазоне, рекомендованном многочисленными исследователями МРТ, при котором обеспечивается минимум гидравлических потерь в лопаточных аппаратах. Этот диапазон лежит в пределах $12^\circ - 20^\circ$. Изменение степени выпуска обеспечивалось уменьшением количества сопел от максимума до одного сопла. При этом для всех исследованных МРТ выполнялись 4 степени выпуска с $z_c = (z_c)_{\max}$, $z_c < 0,5(z_c)_{\max}$; $z_c = 2$ и $z_c = 1$. Для каждого геометрического угла наклона сопел β_{1r} величина ε получается разной при равном количестве сопел.

Особое внимание уделялось выполнению и размещению облопаченного сектора РК. Согласно рекомендациям для традиционных парциальных двухступенчатых турбин, степень выпуска второй ступени должна быть увеличена на $20 \div 30 \%$ по отношению к степени выпуска СА и активная дуга должна быть смещена на эту величину в сторону вращения РК. Применимость этих выводов к турбинам с частичным облопачиванием РК и вращающимся СА проверялась уже на стадии наладочных экспериментов в диапазоне $U/C_0 = 0,2 \div 0,35$. Как показала проверка, новые турбины не проявили каких-либо новых свойств в отношении отмеченных рекомендаций. В диапазоне $\varepsilon_{PK} = (1,2 \div 1,3)\varepsilon_{CA}$ не обнаружено вообще какого-либо изменения к.п.д. Хотя при этом необходимо учитывать и величину погрешности эксперимента, но в любом случае, проявленная нечувствительность в указанном диапазоне говорит о том, что возможные изменения к.п.д. не выходят за рамки доверительного интервала. То же можно отнести и к смещению облопаченного сектора РК по отношению к активной дуге СА. Поэтому, в связи с тем, что не выявлено существенных отличий рекомендаций других авторов по обычным парциальным МРТ от проявленных свойств двухступенчатых МРТ с частичным облопачиванием РК, то для всех исследованных турбин приняты известные рекомендации.

Турбина $\beta_{1r} = 20^\circ$ испытывалась при $z_c = 11; 5; 2; 1$. Это соответствует степени парциальности $\varepsilon_I = 1; 0,455; 0,182; 0,091$. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунках 2 - 5. Как видно из графиков, максимум к.п.д. при полном выпуске $\eta_i = 48,5 \%$ достигается при $\pi_T = 3,2$. Значение $(U/C_0)_{\text{опт}} = 0,27$ примерно соответствует аналогичному u/c_0 для турбин с двумя ступенями скорости. В то же время, при снижении величины ε смещение $(U/C_0)_{\text{опт}}$ в сторону меньших величин происходит не столь значительно, как для ступеней скорости. Так, при минимальном значении $\varepsilon_I = 0,091$ $(U/C_0)_{\text{опт}} = 0,2$. Это можно объяснить влиянием ВСА, у которого оптимум к.п.д. значительно смещен вправо по u/c_0 .

Для минимальной степени выпуска $\varepsilon_I = 0,091$ максимум к.п.д. $\eta_i = 37,5 \%$ достигается также при $\pi_T = 3,2$. Учитывая, что истинное давление перед соплами выше, чем P_0^* из-за компрессорного эффекта в ВСА, то можно сказать, что для $\beta_{1r} = 20^\circ$ π_c примерно соответствует $(\pi_c)_{\text{рас}}$ при максимальных значениях к.п.д.

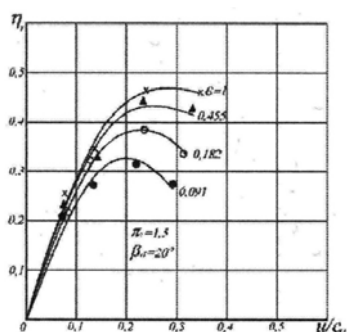


Рис. 2.

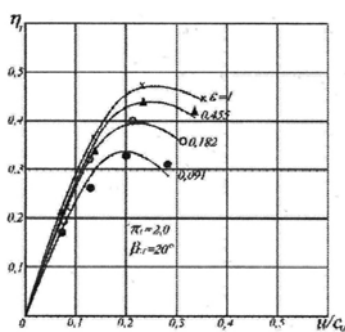


Рис. 3.

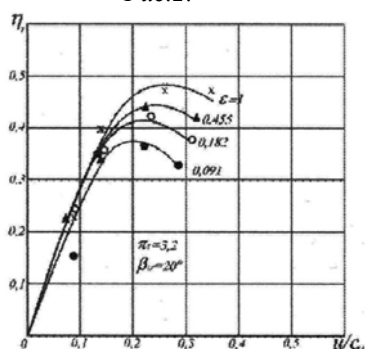


Рис. 4.

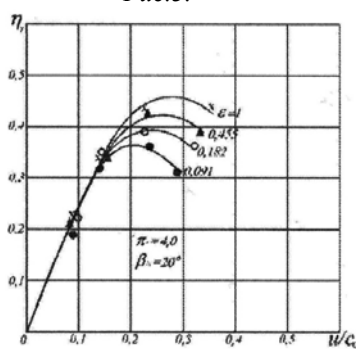


Рис. 5.

Необходимо обратить внимание и на абсолютное значение η_i . Значение $\eta_i = 48,5\%$ при $\varepsilon_I = 1$ почти точно соответствует данным различных авторов для безбандажных микротурбин. Установка бандажа дает прирост к.п.д. при $\varepsilon = 1$ $18 \div 20\%$ относительных или $8 \div 10\%$ абсолютных согласно известным опубликованным данным. В то же время, исследуемые турбины имеют только одно безбандажное РК, поскольку ВСА всегда имеет бандаж. Следовательно, установка бандажа на РК дает прирост к.п.д. по крайней мере, в два раза меньший, чем для обычных МРТ. С другой стороны, при малых значениях ε_{II} необлопаченный сектор РК занимает подавляющую часть окружности РК, что аналогично установке бандажа за исключением активной зоны. Поэтому парциальные безбандажные МРТ с частичным облопачиванием РК более корректно сравнить с обандаженными МРТ традиционного типа, что в дальнейшем и будет сделано.

Более высокие значения к.п.д. при всех π_T наблюдаются у МРТ с $\beta_{IT} = 16^\circ$ (рисунки 6 - 9). Так, $(\eta_i)_{\max} = 52,5\%$ достигается при $\pi_T = 2,0$ и $\pi_T = 3,1$. Несколько меньшее значение к.п.д. при $\pi_T = 1,5$ и $\pi_T = 4,0$. Однако, снижение к.п.д. не превышает 1% . Поэтому, с учетом погрешности эксперимента можно считать, что к.п.д. при $\varepsilon = 1$ практически не меняется во всем исследованном диапазоне π_T . Иначе говоря, МРТ с ВСА при $\varepsilon = 1$ конструктивно многорежимны. Это обнаруженное свойство весьма существенно для транспортных ГТД.

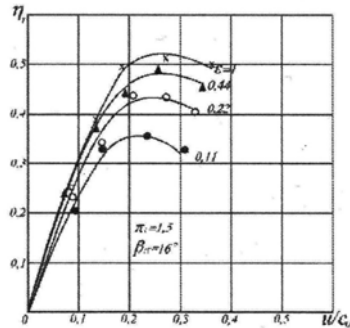


Рис. 6.

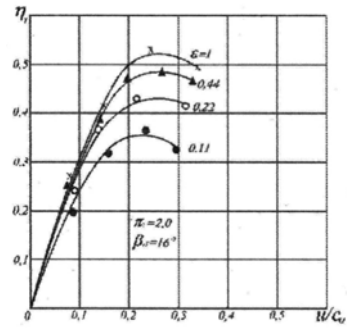


Рис. 7.

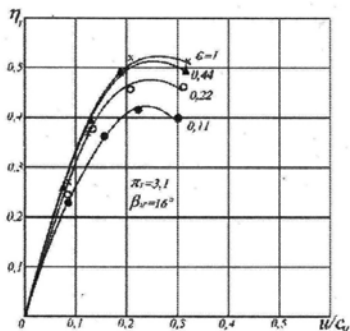


Рис. 8.

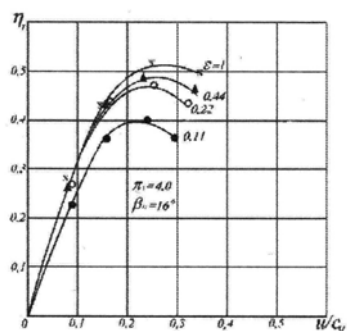


Рис. 9.

При изменении степени парциальности зависимости к.п.д. существенно меняются, причем в зависимости от π_T эти изменения различны. Так, при $\pi_T = 1,5$ уменьшение ε_I от 1 до 0,11 приводит к монотонному падению к.п.д. на 16 % (от 52 % до 36 %). Почти идентичная закономерность наблюдается и при $\pi_T = 2,0$ (падение от 52,5 % до 36 %). При достижении расчетных значений π_T картина существенно меняется. Максимальное падение к.п.д. составляет 10 % для $\pi_T = 3,1$ и 11,5 % для $\pi_T = 4,0$. Причем разница в к.п.д. для $\varepsilon_I = 1$ и $\varepsilon_I = 0,22$ составляет всего 4,5 % при $\pi_T = 3,1$ и $\pi_T = 4,0$. Отмеченные закономерности можно объяснить тем, что при достижении расчетных значений по π_T степень реактивности также приближается к расчетной, т.е. давление по зазорам выравнивается и приближается к давлению за турбиной. Следовательно, уменьшаются перетечки между ступенями, а также утечка вверх РК. Все это приводит не только к снижению потерь от утечек, но и уменьшению потерь от смещения в зазорах. Кроме того, при расчетных значениях π_T уменьшаются углы атаки на НА и РК, что также способствует снижению потерь в этих элементах.

Анализ абсолютных значений к.п.д. особенно важен для оценки места таких МРТ в ряду других конструкций. Как уже отмечалось, турбины испытывались без бандажа на РК. При $\varepsilon = 1$ $(\eta_i)_{\max}$ превышает к.п.д. обычных МРТ без бандажа со ступенями скорости при равных геометрических размерах. Это легко объясняется тем, что в предлагаемых конструкциях только одно РК не имеет



бандажа. В то же время, опыты А.С. Наталевича, Н.Т. Тихонова, Н.Р. Мусаткина и некоторых других авторов [2, 3] с турбинами подобных размеров показывают, что в обандаженных ступенях к.п.д. достигает $60 \div 62\%$ при $\varepsilon = 1$. Если учесть, что установка бандажа на одно РК из двух дает прирост к.п.д. только на $5 \div 6\%$ абсолютных, то нетрудно заметить, что двухступенчатые турбины с ВСА и обандаженным РК достигают к.п.д. не выше 58% . Это говорит о том, что при $\varepsilon = 1$ обычные МРТ со ступенями скорости более эффективны, чем турбины с ВСА. Хотя свойство многорежимности в некоторых случаях может стать более веским аргументом, чем величина к.п.д. на одном режиме.

При уменьшении степени парциальности в обычных МРТ к.п.д. стремительно падает, что связано в первую очередь с потерями от вентиляции. МРТ с частичным облопачиванием РК свободны от этого недостатка, поэтому и падение к.п.д. не столь значительно.

Кроме того, отсутствие бандажа не сказывается столь значительно, как в обычных турбинах. На рис. 14 приведено сравнение абсолютных значений экспериментальных к.п.д. для одноступенчатой и двухступенчатой обандаженных микротурбин по работе [2] и турбины с частичным облопачиванием РК. Причем, традиционные турбины имели даже большую степень впуска ($\varepsilon_I = 0,129$), чем исследуемая ($\varepsilon_I = 0,11$). Тем не менее, при оптимальных значениях u/c_0 к.п.д. турбины с частичным облопачиванием РК на $5,5\%$ выше, чем у обычной парциальной турбины. Здесь уместно еще раз отметить, что традиционные турбины были с бандажом, а исследуемая - без бандажа.

Таким образом, можно констатировать, что двухступенчатые турбины с частичным облопачиванием РК эффективнее обычных парциальных при равных значениях ε , особенно в области $\varepsilon < 0,2$.

Почти идентичные зависимости к.п.д. получены для угла $\beta_{1Г} = 12^\circ$ (рисунки 10 - 13). Численные значения максимальных и минимальных к.п.д. остались практически такими же, как и для МРТ с $\beta_{1Г} = 16^\circ$ ($\eta_{i\max} = 52,5\%$; $\eta_{i\min} = 38\%$). Причем, при $\pi_T = 3,1$ для $\varepsilon_I = 0,143$ $\eta_{i\max} = 43\%$. Оптимальные значения u/c_0 также изменяются от $0,28$ при $\varepsilon = 1$ до $0,2$ при $\varepsilon_I = 0,143$.

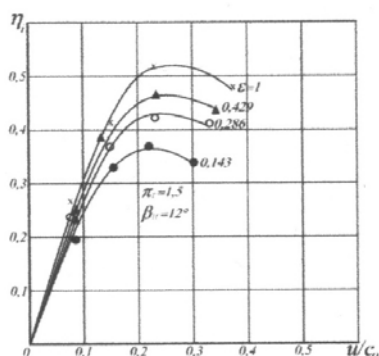


Рис.10.

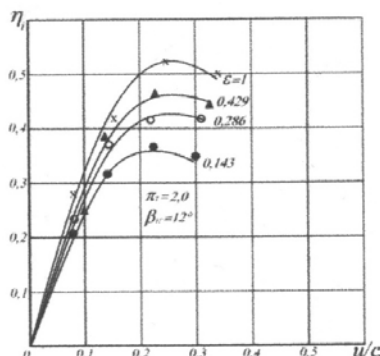


Рис.11.

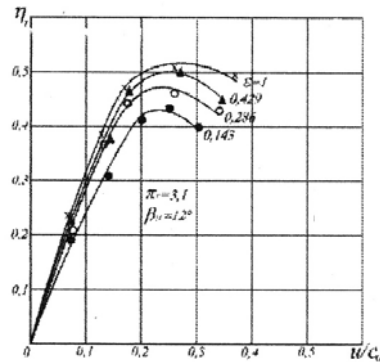


Рис.12.

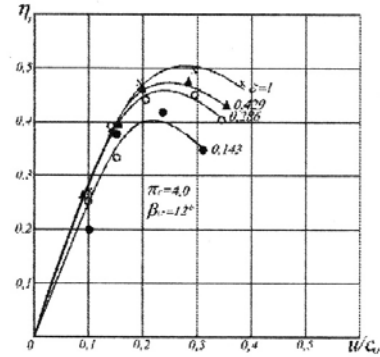


Рис.13.

Тот факт, что уменьшение $\beta_{1\Gamma}$ не повлияло на к.п.д. говорит прежде всего о влиянии ВСА. Действительно, при уменьшении $\beta_{1\Gamma}$ возрастает окружная работа на ВСА, что компенсирует некоторое возрастание потерь в последующих лопаточных венцах из-за увеличения угла поворота потока. Кроме того, анализ треугольников скоростей показывает, что при этом потери с выходной скоростью должны снижаться.

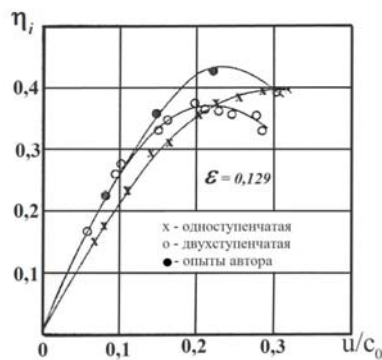


Рис.14.

Вывод

Осевые двухступенчатые турбины с частичным облопачиванием безбандажного РК эффективнее традиционных парциальных турбин с обандаженными РК на 5.5 % при $\varepsilon < 0.2$. При $\varepsilon > 0.5$ исследованные турбины проявляют свойство многорежимности, что обусловлено характером взаимного влияния вращающегося соплового аппарата и осевого РК.

Библиографические ссылки

1. АС 1420190 СССР. Парциальная турбина //Дальрыбвтуз; Авт. изобрет. С.В. Чехранов, И.И. Кириллов. - Оpubл. в Б.И., 1988, №32.
2. Наталевич А.С. Воздушные микротурбины. М.: Машиностроение, 1979. 192 с.
3. Тихонов Н.Т., Пфаифле Э.Э. Влияние высоты лопаток соплового аппарата осевых микротурбин на коэффициент скорости и угол выхода потока //Иzv. ВУЗов. Авиационная техника. - 1990. - №4.