

УДК 621.438.001 2 (02)

Н.Ф. МУСАТКИН, В.М. РАДЬКО

*Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королёва, Россия*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ РАЦИОНАЛЬНЫХ УДЛИНЕНИЙ СОПЛОВЫХ И РАБОЧИХ ВЕНЦОВ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ОСЕВЫХ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ТУРБИН СО СТУПЕНЯМИ СКОРОСТИ

Поставлена задача улучшения технологичности конструкции осевых малоразмерных турбин (ОМТ) при сохранении уровня кпд. Обоснован выбор в качестве исследуемого параметра удлинения лопаточных венцов. Используются для решения задачи по определению его влияния на кпд ОМТ методика и оборудование, разработанные в СГАУ. Приведены результаты расчётно-экспериментальных исследований по определению областей рациональных удлинений сопловых и рабочих венцов, во многом обуславливающих технологичность конструкции двух-трёхступенчатых осевых малоразмерных турбин со ступенями скорости как при полном, так и при парциальном подводе рабочего тела. Описаны физические причины влияния удлинения лопаточных венцов на эффективность рабочего процесса в ОМТ. Приводятся рекомендации для газодинамического проектирования указанных типов турбин, справедливые при степенях повышения давления $\pi_r = 10 \dots 20$, числах Маха $M_{1s} = 1,6 \dots 2,2$ и Рейнольдса $Re = (5 \dots 10) \cdot 10^5$.

турбина осевая малоразмерная, число ступеней, степень парциальности, параметр нагруженности, коэффициент полезного действия, аппараты сопловые, колеса рабочие, удлинение лопаток

1. Формулирование задачи

К числу основных геометрических параметров, определяющих облик проточной части осевых малоразмерных турбин (ОМТ), можно отнести

- удлинения лопаточных венцов $\bar{h}_{ji} = \frac{h_{ji}}{b_{ji}}$,

где h_{ji} – высота лопаток в i -ом сечении;

b_{ji} – хорда профилей лопаток сопловых или рабочих венцов;

индекс j указывает на принадлежность к сопловым или рабочим решёткам ОМТ;

- относительный шаг $\bar{t}_{ji} = \frac{t_{ji}}{b_{ji}}$,

где t_{ji} – шаг лопаток.

Удлинения \bar{h}_{ji} в значительной степени определяют кпд турбины η_r , осевые габариты и массу турбинного двигателя, что особенно важно при проектировании многоступенчатых бортовых турбоприводов летательных аппаратов длительного функционирования.

От выбранного значения величины \bar{h}_{ji} непосред-

ственно зависят хорды профилей лопаток b_{ji} , а поскольку относительный шаг \bar{t}_{ji} выбирается в оптимальных пределах, то и шаг решёток t_{ji} . Последнее означает, что удлинения предопределяют число лопаток z_i в венце, во многом обуславливающее технологичность конструкции.

Учитывая изложенное, очевидно, что определение рациональных диапазонов \bar{h}_{ji} как сопловых, так и рабочих венцов многоступенчатых ОМТ является актуальной задачей.

2. Решение задачи

К настоящему времени известны работы [6, 7], в которых приведены сведения по выбору удлинений \bar{h}_{CAi} и \bar{h}_{PKi} одно- и двухступенчатых ОМТ. При этом показано, что $(\bar{h}_{CAi})_{opt} = 0,2 \dots 0,3$ и $(\bar{h}_{PKi})_{opt} = 0,15 \dots 0,35$. Наличие оптимальных удлинений в венцах соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК) авторы работы [6] связывают с перераспределением баланса потерь энергии в последних. В частности, при $\bar{t}_{ji} = const$ уменьшение \bar{h}_{ji} обуславливает возрастание концевых и дисковых потерь, что со-

провождается снижением η_T . Но, с другой стороны, поток в межвенцовом зазоре становится более равномерным из-за увеличения абсолютной величины t_{CAi} , снижаются относительная шероховатость поверхности каналов и число лопаток в венцах, что сопровождается уменьшением профильных потерь энергии. В результате – η_T увеличивается. Противоположное влияние названных двух групп потерь энергии на η_T и определяет наличие $(\bar{h}_{ji})_{opt}$.

В работе [7] лишь отмечается, что при $\pi_T = 3 \dots 6$ и параметре нагруженности $Y_T = 0,1 \dots 0,2$ удлинения \bar{h}_{CAi} и \bar{h}_{PKi} для двухступенчатых ОМТ можно принимать такими же, как и для одноступенчатых ОМТ.

Для трёхступенчатых ОМТ рекомендации работ [6, 7] если и могут быть использованы, то лишь частично. Дело в том, что характерные диапазоны π_T и Y_T для выше указанных турбин отличаются количественно, а влияние степени парциальности ε на величины \bar{h}_{ji} не рассматривалось.

Из этого следует, что надёжных рекомендаций по выбору $(\bar{h}_{ji})_{opt}$ нет не только для многоступенчатых

ОМТ, но даже и для одноступенчатых при $\varepsilon < 1$. Для восполнения пробела в СГАУ были проведены обширные экспериментальные исследования.

В качестве объекта исследования использовалась трёхступенчатая турбина блочной конструкции, которая описана в работах [4, 5]. Блочная конструкция ОМТ позволяла изменять количество ступеней и испытывать турбину как одноступенчатую, так и двухступенчатую, и, наконец, как трёхступенчатую. Турбина имела типовое значение среднего диаметра $D_{cp} = 8 \cdot 10^{-2}$ м, высоты лопаток СА первой ступени $h_{CA1} = 1 \cdot 10^{-3}$ м и работала в диапазонах $\pi_T = 10 \dots 20$ и $Y_T = 0,05 \dots 0,2$. Рабочим телом являлся сжатый воздух с параметрами состояния: $p_0^* = (10 \dots 20) \cdot 10^2$ кПа и $T_0^* = (280 \dots 320) K$, что соответствовало числам Маха $M_{1s} = 1,6 \dots 2,2$ и Рейнольдса – $Re = (5 \dots 10) \cdot 10^5$.

Исследования проводились на тормозном стенде [2], который позволяет получать интегральные характеристики опытных ОМТ в виде зависимостей

$$\eta_T = f(Y_T, X_1, X_2, X_3, \dots, X_{10}),$$

где X_i – исследуемый параметр с наиболее вероятной погрешностью $\pm 1,5\%$.

Методика проведения эксперимента схематично показана на рис. 1, а, б. Изменение удлинений \bar{h}_{CAi} и \bar{h}_{PKi} достигалось за счёт увеличения соответствующих значений хорд профилей b_{CAi} и b_{PKi} (рис 1, б). При этом оптимальные значения относительного шага решёток $(\bar{t}_{CAi})_{opt}$ и $(\bar{t}_{PKi})_{opt}$ выдерживались постоянными посредством изменения абсолютных значений шага решёток профилей t_{CAi} и t_{PKi} , а, следовательно, и числа лопаток в венцах z_{CAi} и z_{PKi} .

При изготовлении профилей колёс как СА, так и РК всех без исключения ступеней, соблюдалось геометрическое подобие, что достигалось соответствующим масштабом на пантографе копировально-фрезерного станка. Величина масштаба всякий раз определялась отношением b_i/b_0 , где b_i – значение хорды профиля при произвольной величине \bar{h}_{ji} ; b_0 – величина хорды профиля лопаток для предельного удлинения \bar{h}_{max} , соответствующего минимально

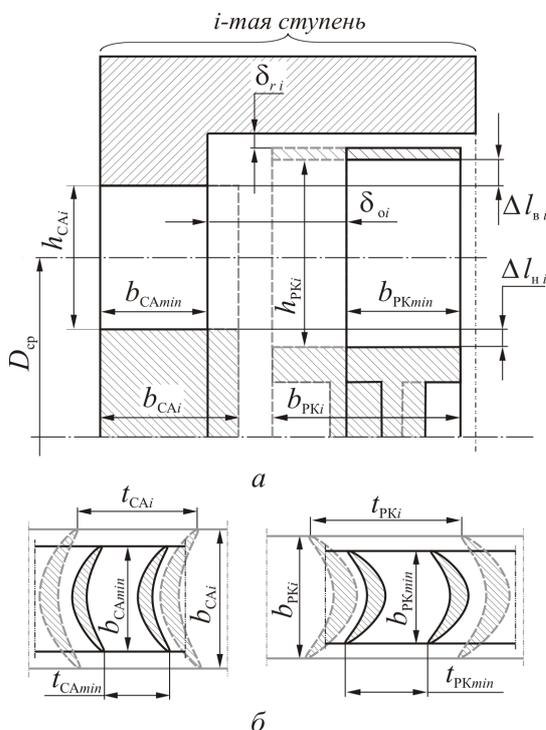


Рис. 1. Схема проведения исследований по влиянию \bar{h}_{CAi} и \bar{h}_{PKi} на η_T ОМТ: а – монтажная схема блока отдельной ступени; б – схема изменения удлинений \bar{h}_{CAi} и \bar{h}_{PKi}

возможному (по условиям изготовления) значению абсолютного шага $t_{ji\ min}$.

Известно, что шаг решеток t_{ji} определяется отношением $a_{2\ CA}/\sin(\alpha_{1\ л})$ для СА или $a_{2\ РК}/\sin(\beta_{2\ л})$ – для РК [5], где $a_{г\ j}$ – ширина горла межлопаточного канала; $\alpha_{1\ л}$, $\beta_{2\ л}$ – конструктивные углы выходных кромок сопловых и рабочих венцов соответственно.

Минимальное значение $a_{г\ j}$ по условиям изготовления не может быть менее $1 \cdot 10^{-3}$ м, а типовые значения углов $\alpha_{1\ л}$, $\beta_{2\ л}$ лежат в пределах $20 \dots 25^\circ$. В результате величина $t_{ji\ min} = (4,5 \dots 4,6) \cdot 10^{-3}$ м и соответствовала $b_0 = (6,8 \dots 7,0) \cdot 10^{-3}$ м.

Все основные геометрические соотношения проточной части ОМТ (рис. 1, а) (верхние и нижние перекрыши Δ_v и Δ_n , относительные осевые и радиальные зазоры $\bar{\Delta}_o$ и $\bar{\Delta}_r$, формы профилей лопаток) выполнялись в соответствии с рекомендациями [6] и оставались неизменными для всех опытных вариантов \bar{h}_{ji} . Опыты проводились как при полном ($\varepsilon = 1$), так при парциальном ($\varepsilon < 1$) подводах рабочего тела. При исследовании ОМТ с $\varepsilon < 1$ оптимальные значения параметров парциального подвода в ступенях ($\varepsilon_I/\varepsilon_{II}$) и ($\varepsilon_{II}/\varepsilon_{III}$) выбирались по данным [4], относительного шага $(\bar{t}_{ji})_{opt}$ – по [5].

На первом этапе исследовалось влияние удлинения лопаток РК первой ступени $\bar{h}_{РК\ I}$ на КПД $\eta_{тл}$. Удлинение лопаток СА первой ступени при этом составляло $\bar{h}_{СА\ I} = 0,3$ и в процессе опытов данного этапа не менялось. Как подтверждение физической картины этому можно принять разъяснения [7], что в активных турбинах срабатывание всего теплоперепада именно в первом СА определяет удлинение $\bar{h}_{СА\ I}$ посредством газодинамических предпосылок, которое не может варьироваться в широких пределах без заметного снижения $\eta_{тл}$. Для экспериментов было изготовлено семь РК первой ступени с различными удлинениями от 0,35 до 0,1.

В первой серии опытов блоки второй и третьей ступеней были сняты с общего вала, и их влияние не

сказывалось на результатах исследования. Величина ε_I изменялась от 0,06 до 1,0.

Для каждой степени парциальности при разных РК и, соответственно, $\bar{h}_{РК\ I}$ определялись характеристики $\eta_{тл} = f(Y_T)$. Полученные зависимости при изменении π_T во всём исследуемом диапазоне сравнивались между собой согласно условиям: $Y_T = const$ и $\varepsilon_I = const$.

На основании первичного анализа были получены зависимости $\eta_{тл} = f(\varepsilon_I, \bar{h}_{РК\ I})$ при различных π_T и Y_T .

Аналогичная последовательность проведения опытов наблюдалась и при изучении влияния $\bar{h}_{РК\ II}$ на $\eta_{тл}$ двухступенчатой ОМТ и $\bar{h}_{РК\ III}$ на $\eta_{тл}$ трёхступенчатой ОМТ. Очевидно, что соотношения ($\varepsilon_I/\varepsilon_{II}$) и ($\varepsilon_{II}/\varepsilon_{III}$) выдерживались согласно рекомендациям [4].

Полный анализ кривых показал, что качественно вид опытных зависимостей остаётся одинаковым для всего диапазона характерных параметров: $\pi_T = 10 \dots 20$; $Y_T = 0,05 \dots 0,2$ и $\varepsilon_I = 0,06 \dots 1,0$.

На рис. 2, а, б приведена обобщённая зависимость $\eta_{тл} = f(\varepsilon_I, \bar{h}_{РК\ I})$ для наиболее характерных значений $\pi_T = 15$ и $Y_T = 0,2$. Оптимальный диапазон удлинений $\Delta(\bar{h}_{РК\ I})_{opt}$ ограничивается справа сплошной линией $\bar{h}_{РК\ I\ max} = const$ при значении последнего параметра, равном 0,37, а слева – пунктирной линией, за левым пределом которой снижение $\eta_{тл}$ составляло более 1,5% (абс.), то есть более погрешности эксперимента. Предложено называть эту линию границей оптимальных диапазонов удлинений лопаточных венцов.

Зависимости, представленные на рис. 2, а, б, позволяют оценить влияние многоступенчатости преобразования энергии в ОМТ на максимальную величину КПД $\eta_{тл\ max}$ при $\varepsilon_I = 0,5 \dots 1,0$. Можно утверждать, что $\eta_{тл\ max}$ не зависит от изменения $\bar{h}_{РК\ I}$ в диапазоне $0,2 \dots 0,36$, от $\bar{h}_{РК\ II}$ – в диапазоне $0,18 \dots 0,36$ и от $\bar{h}_{РК\ III}$ – на отрезке от 0,17 до 0,36. Пределы $\Delta(\bar{h}_{РК\ i})_{opt}$ сохраняются для всех значений $\varepsilon_I \geq 0,5$.

Опытные характеристики $\eta_{тл} = f(\varepsilon_I, \bar{h}_{РК\ i})$ показали так же, что интенсивность изменения $\eta_{тл}$ за гра-

ницей оптимальных диапазонов снижалась с уменьшением ε_1 . К примеру, относительное падение η_T для РК I при уменьшении предельного значения $\Delta(\bar{h}_{PKI})_{opt}$ на 25% (рис. 2, а) составляло 10,2% при $\varepsilon_1 \geq 0,5$ и всего лишь 3,5% при $\varepsilon_1 = 0,06$.

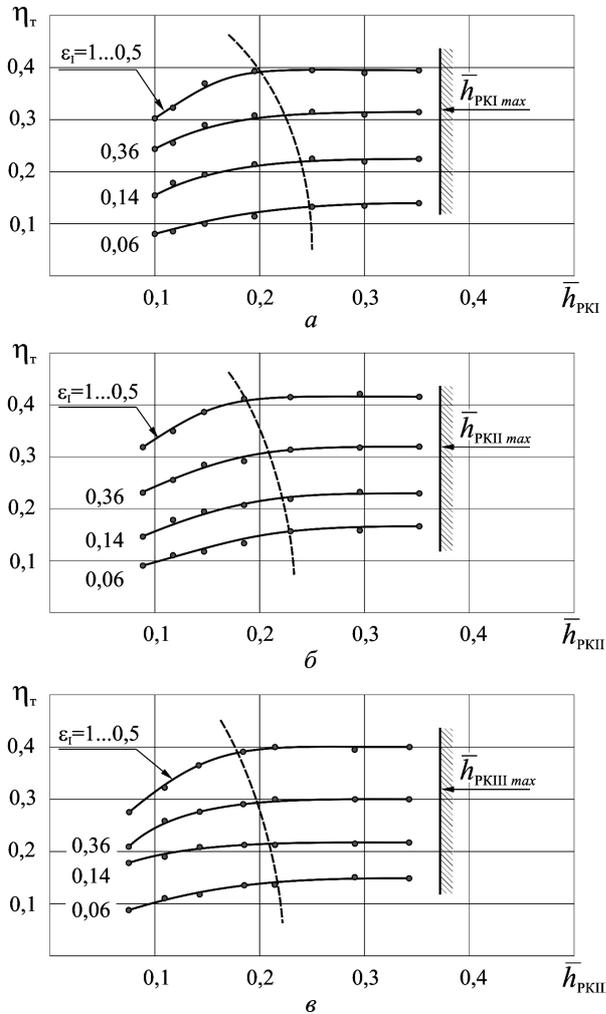


Рис. 2. Влияние удлинения рабочих венцов при $\pi_T = 15$ и $Y_T = 0,2$ и $\varepsilon = var$ на η_T :
 а – одноступенчатых; б – двухступенчатых,
 в – трёхступенчатых ОМТ

Такая тенденция изменения η_T оставалась характерной и для других колёс (РК II и РК III, рис. 2, б, в). Объяснить её можно следующим образом. При $\varepsilon_1 \geq 0,5$ потери энергии рабочего тела при растекании его на концах дуги подвода невелики в сравнении с концевыми потерями энергии. Поэтому, снижение \bar{h}_{PKi} от предельного значения $(\bar{h}_{PKI})_{max} = 0,2$, вызывая заметный рост концевых потерь энергии, определяет интенсивность изменения η_T . При $\varepsilon_1 \leq 0,5$

влияние потерь энергии от растекания рабочего тела на концах дуги подвода становится более весомым [7]. Как следствие, изменение \bar{h}_{PKi} в тех же пределах, что и в случае $\varepsilon_1 \geq 0,5$, вызывает снижение потерь энергии рабочего тела от растекания, которое заметно компенсирует рост концевых потерь. В результате интенсивность трансформаций величин η_T снижается.

При анализе зависимостей $\eta_T = f(\varepsilon_1, \bar{h}_{PKi})$ обращает на себя внимание следующая особенность. С уменьшением ε_1 диапазон оптимальных значений $\Delta(\bar{h}_{PKi})_{opt}$ суживается. Например, для РК I при $\varepsilon_1 \geq 0,5$ величина $\Delta(\bar{h}_{PKI})_{opt} = 0,2 \dots 0,36$, а при $\varepsilon_1 = 0,06$ этот диапазон составляет $0,25 \dots 0,36$. Качественно такое же поведение кривых характерно для РК II и РК III. Это можно объяснить только тем, что при малых $\varepsilon_1 < 0,4$ баланс потерь энергии (концевых, на трение, выколачивание и растекание на концах дуги подвода) сохраняется в меньших пределах из-за начинающегося проявления дисковых потерь энергии при более широких венцах [7], что соответствует более низким удлинениям \bar{h}_{PKi} .

Влияние удлинений СА II и СА III изучалось в той же последовательности и по той же методике, что и рабочих венцов.

Приведенный первичный анализ позволил построить обобщённые кривые $\eta_T = f(\varepsilon_1, \bar{h}_{CAi})$. Установлено, что качественный характер последних одинаков в диапазонах $\pi_T = 10 \dots 20$; $Y_T = 0,05 \dots 0,2$. Для $\pi_T = 15$ и $Y_T = 0,2$ такие зависимости приведены на рис. 3, а, б, из которых следует, что при $\varepsilon_1 \geq 0,5$ величина $\Delta(\bar{h}_{CAi})_{opt}$ одинакова как для второй, так и для третьей ступеней и находится в пределах $0,2 \dots 0,35$. Указанный предел практически полностью при $\varepsilon_1 \geq 0,5$ соответствует оптимальным удлинениям $\Delta(\bar{h}_{PKi})_{opt}$ (рис. 2, а...в), что означает справедливость начального предположения об аналогичном влиянии потерь энергии рабочего тела в

сопловых и рабочих венцах ОМТ со ступенями скорости. Дополнительным подтверждением служит сужение диапазона $\Delta(\bar{h}_{CAi})_{opt}$ при $\varepsilon_1 < 0,4$, который при наименьшей исследованной степени парциальности $\varepsilon_1 = 0,06$ составлял $0,25 \dots 0,35$.

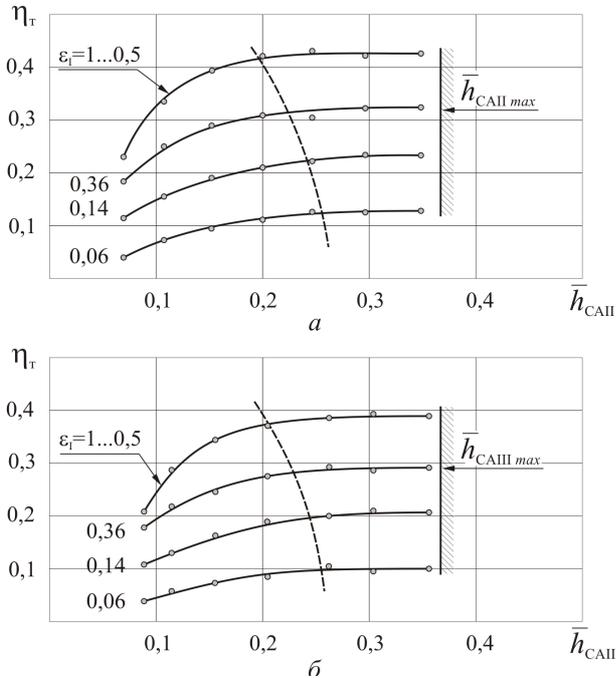


Рис. 3. Влияние удлинения сопловых венцов при $\pi_T = 15$ и $Y_T = 0,2$ и $\varepsilon = var$ на η_T :
 а – двухступенчатых,
 б – трёхступенчатых ОМТ

В то же время расслоения левых границ оптимального диапазона $\Delta(\bar{h}_{CAi})_{opt}$ в сопловых венцах, в отличие от рабочих, не наблюдается. Объяснение, как указывается выше, заключается в том, что в рабочих венцах, особенно при низких степенях парциальности $\varepsilon_1 < 0,4$, начинают проявляться дисковые потери, а в сопловых венцах таковых нет, поскольку последние неподвижны.

На рис. 4 приведены зависимости $\Delta(\bar{h}_{CAi})_{opt} = f(\varepsilon_1)$ при $\pi_T = 10 \dots 20$; $Y_T = 0,05 \dots 0,2$, а на рис. 5 – $\Delta(\bar{h}_{PKi})_{opt} = f(\varepsilon_1)$ для тех же диапазонов π_T и Y_T . Представленный вид зависимостей наиболее удобен в практике проектирования многоступенчатых ОМТ.

Заканчивая анализ проведённых исследований, следует отметить, что наряду с выявленным свойст-

вом двух-трёхступенчатых ОМТ сохранять практически неизменным η_T в широких диапазонах $\Delta(\bar{h}_{CAi})_{opt} = 0,20 \dots 0,35$ и $\Delta(\bar{h}_{PKi})_{opt} = 0,20 \dots 0,36$ при $\varepsilon_1 \geq 0,5$, для меньших значений ε_1 эти диапазоны суживаются: при $\varepsilon_1 = 0,06$ для РК первой ступени (рис. 5) на 25% (отн.), для второй – на 20% (отн.), для третьей – до 15% (отн.). При этом снижение η_T не превышает (2...3)% (отн.). Для сопловых венцов как второй, так и третьей ступени сужение одинаково и составляет до 25% при $\varepsilon_1 = 0,06$.

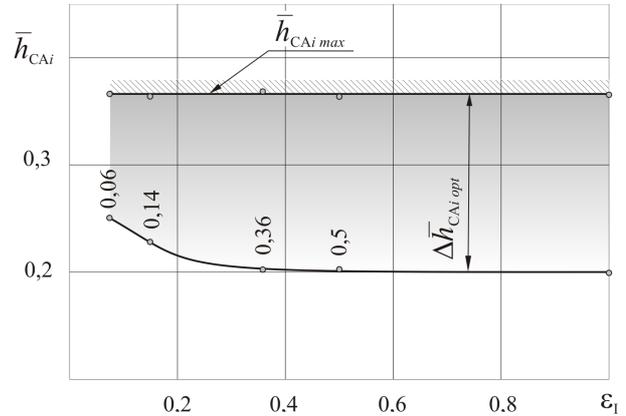


Рис. 4. Зависимость $\Delta \bar{h}_{CAi opt} = f(\varepsilon_1)$ при $\pi_T = 15$ и $Y_T = 0,05 \dots 0,2$

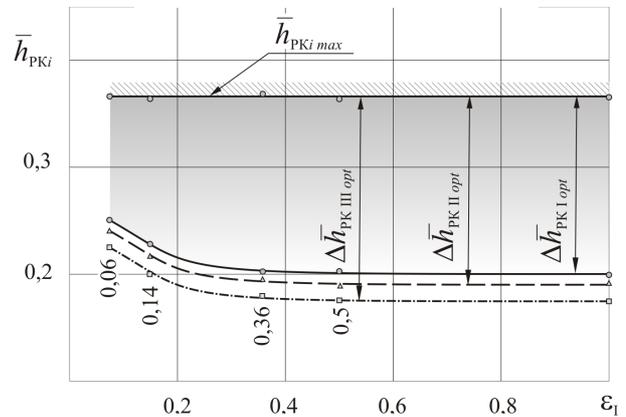


Рис. 5. Зависимость $\Delta \bar{h}_{PKi opt} = f(\varepsilon_1)$ при $\pi_T = 15$ и $Y_T = 0,05 \dots 0,2$

Выявленное обстоятельство является весьма важным в технологическом отношении, так как позволяет при необходимости выполнять лопатки рабочих венцов с малыми удлинениями, а значит, с меньшим числом лопаток, более массивными, с увеличенными толщинами входных и выходных кромок. Последнее, по нашему мнению, позволяет повысить ресурс их

работы и надёжность ОМТ в целом. При этом некоторые ограничения для сопловых венцов несущественны, поскольку последние выполняются, как правило, с парциальным подводом рабочего тела. Следовательно, изготовление лопаток СА, в отличие от РК, не является столь проблемным [7].

Результаты обработки и обобщения экспериментальных данных позволяют рекомендовать для выбора оптимальных значений удлинений следующие эмпирические формулы.

Оптимальному удлинению сопловых венцов соответствует интервал значений (рис. 4):

$$\Delta(\bar{h}_{CAi})_{opt e} = \bar{h}_{CAi min} \dots \bar{h}_{CAi max}, \quad (1)$$

где $\bar{h}_{CAi min} = 0,2$; $\bar{h}_{CAi max} = 0,35$ при $\varepsilon_1 \geq 0,5$.

При степени парциальности $\varepsilon_1 < 0,5$

$$\Delta(\bar{h}_{CAi})_{min e} = 0,2 + 5 \cdot 10^{-2} Y_T (1 + \varepsilon_1) \times \left[\frac{0,5 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \right]^{(1 + \varepsilon_1)}. \quad (2)$$

Для РК оптимальный интервал удлинений (рис. 5) можно определить из выражения:

$$\Delta(\bar{h}_{PKi})_{opt e} = \bar{h}_{PKi min} \dots \bar{h}_{PKi max}, \quad (3)$$

где $\bar{h}_{PKi min} = 0,2 \sqrt{z}$; $\bar{h}_{PKi max} = 0,35$ при $\varepsilon_1 \geq 0,5$ (здесь z – число ступеней в турбине).

Для значений $\varepsilon_1 < 0,5$

$$\Delta(\bar{h}_{PKi})_{min e} = 0,2 + 5 \cdot 10^{-2} Y_T \sqrt{z} (1 + \varepsilon_1) \times \left[\frac{0,5 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \right]^{(1 + \varepsilon_1)}. \quad (4)$$

Адекватность полученных результатов была проверена ещё для двух типоразмеров двух- трёх- ступенчатых ОМТ, которые имели значения $D_{cp} = 0,10$ и $0,05$ м. контрольные испытания показали хорошую сходимость опытных данных и результатов расчётов по выражениям (1)...(4).

Таким образом, поставленная в начале работы задача решена. Найдены оптимальные диапазоны удлинений сопловых и рабочих венцов многоступенчатых ОМТ со ступенями скорости как при полном ($\varepsilon_1 = 1$), так при парциальном ($\varepsilon_1 < 1$) подводах

рабочего тела. Установлено, что полученные расчётные соотношения (1)...(4) справедливы для чисел $M_{1s} = 1,6 \dots 2,2$ и $Re = (5 \dots 10) \cdot 10^5$, которые соответствуют наиболее характерным режимам работы и типоразмерам ОМТ.

Литература

1. Быков Н.Н., Емин О.Н. Выбор параметров и расчёт маломощных турбин для привода агрегатов. – М.: Машиностроение, 1972. – 228 с.

2. Лапчук О.А., Тихонов Н.Т. Электротормоз для испытаний микротурбин // В сб. “Испытания авиационных двигателей”. – Уфа: УАИ. – 1980. – № 8. – С. 126-129.

3. Мусаткин Н.Ф. Радько В.М. К вопросу распределения теплоперепада в двухступенчатых осевых малоразмерных турбинах со ступенями давления // Изв. вузов. Авиационная техника. – Казань: КГТУ (КАИ). – 2003. – № 3. – С. 26-28.

4. Мусаткин Н.Ф. Радько В.М. Влияние параметров парциального подвода рабочего тела на КПД многоступенчатых осевых малоразмерных турбин // Авиационно-космическая техника и технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2006. – № 7(33). – С. 81-86.

5. Мусаткин Н.Ф. Радько В.М. Определение рациональных диапазонов относительного шага сопловых и рабочих венцов многоступенчатых осевых малоразмерных турбин // Вестник двигателестроения. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич». – 2007. – № 3. – С. 95-100.

6. Мусаткин Н.Ф. Тихонов Н.Т. Влияние верхней и нижней перекрыш на КПД парциальной осевой воздушной микротурбины // Изв. вузов. Авиационная техника. – Казань: КАИ. – 1979. – № 3. – С. 106-108.

7. Наталевич А.С. Воздушные микротурбины. – М.: Машиностроение, 1983. – 192 с.

Поступила в редакцию 5.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук А.А. Маркин, ГУП ГРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», Самара, Россия.