

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ДИАМЕТРОВ ВЫХОДА И ВХОДА В РАБОЧЕЕ КОЛЕСО ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ МИКРОТУРБИНЫ НА МОЩНОСТНОЙ КПД ПРИ НИЗКИХ ЗНАЧЕНИЯХ СТЕПЕНИ ПОНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Матвеев В.Н., Радько В.М., Тихонов Н.Т.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г.Самара

Существует целый класс микротурбин, работающих при низких значениях степени понижения давления π_r в ступени. Так микротурбины, работающие от набегающего потока (например, приводы гироскопов систем управления летательных аппаратов) или выхлопных газов поршневых двигателей (турбокомпрессоры двигателей легковых автомобилей) имеют π_r от 1,05 до 1,5. При низких π_r значительно возрастает толщина пограничного слоя в проточной части ступени, что может существенно изменить величины оптимальных размеров по сравнению с их значениями при $\pi_r > 2$.

В частности, в радиальных центростремительных микротурбинах (ЦСМТ) весьма важное влияние на экономичность ступени оказывает выбор наиболее выгодного соотношения диаметров выхода и входа $\bar{D} = D_2/D_1$ в рабочее колесо (РК). Дело в том, что соотношение этих диаметров интенсивно влияет на различные виды потерь в РК. Действительно, при условии $D_1 = \text{const}$ изменение величины D_2 изменяет профильные и выходные потери, величину работы кориолисовых сил инерции, сопротивление на выходе из РК.

Аналитический учёт названных потерь и работы при изменении \bar{D} в настоящее время не представляется возможным. Более того, и постановка экспериментального исследования этого вопроса весьма непростая. Дело в том, что если, например, увеличивать D_2 , т.е. \bar{D} , и при этом сохранять размер горла межлопаточных каналов a_2 , то изменяется число лопаток РК, что связано с существенным изменением и профильных, и концевых потерь. Если же сохранять число лопаток РК, то существенно изменяется размер горла.

Авторы пришли к решению сохранить размер горла, хотя вполне правомочен эксперимент с сохранением числа лопаток.

Для эксперимента использовалась ступень с полуоткрытым РК. Величина π_r изменялась от 1,05 до 2,0, а частота вращения от $15 \cdot 10^3$ до $60 \cdot 10^3$ мин⁻¹, что соответствовало изменению параметра нагруженности $Y_r = \omega/C_{st}$ от 0,1 до 0,4. Высота лопаток соплового аппарата (СА) $h_{СА}$ из-

менялась от 0,5 до 3,0 мм, что соответствовало изменению относительной высоты лопаток $\bar{h}_{CA} = h_{CA}/D_1$ от 0,01 до 0,06.

При выполнении эксперимента величина \bar{D} изменялась от 0,404 до 0,909, что осуществлялось за счёт изменения величины диаметра D_2 на выходе из РК при постоянном значении D_1 .

Как уже отмечалось, увеличение D_2 сопровождалось повышением числа лопаток РК при сохранении величины горла межлопаточных каналов.

Основные геометрические параметры рабочих колёс были такими:

$D_1 = 50$ мм; $D_{вт} = 8$ мм; $\beta_{1т} = 33^\circ$; $\alpha_{1эф} = 15^\circ$; $\beta_{2эф} = 23,4^\circ$; $a_e = 2,1$ мм.

\bar{D}	0,40	0,505	0,606	0,741	0,842	0,909
$D_2, мм$	20,0	25,0	30,0	36,7	41,7	45,0
$z_{рк}$	12	15	18	22	25	27

Величины относительных значений верхней и нижней перекрыш приняты равными соответственно $\bar{\Delta}_в = 0,5$ и $\bar{\Delta}_н = 1,0$, т.е. оптимальными согласно исследований авторов. Соотношение высот лопаток РК на выходе и входе в РК $\bar{h} = h_2/h_1$ изменялось обратно пропорционально изменению соотношения диаметров \bar{D} и определялось по формуле

$$\bar{h}_{opt} = 2,7/\bar{D},$$

где 2,7 - оптимальное значение \bar{h} при $\bar{D} = 0,606$, полученное экспериментально авторами.

В результате величины \bar{h}_{opt} при изменении \bar{D} имели следующие значения:

\bar{D}	0,40	0,505	0,606	0,741	0,842	0,909
\bar{h}_{opt}	4,1	3,2	2,7	2,2	1,9	1,8

Динамические продувки на тормозной установке позволили получить зависимости мощностного кпд от величины \bar{D} при фиксированных значениях π_τ , Y_τ , \bar{h}_{CA} . Для двух значений π_τ и трёх значений \bar{h}_{CA} эти зависимости представлены на рис. 1-3.

Графики показывают, что зависимости $\eta_\tau = f(\bar{D})$ в значительной степени зависят от Y_τ , π_τ и \bar{h}_{CA} . Так, например, при $\bar{h}_{CA} = 0,035$ и $\pi_\tau = 1,05$ (см. рис. 2) кривая $\eta_\tau = f(\bar{D})$ достигает максимума при $\bar{D}_{opt} = 0,7$, если

$Y_T = 0,4$. В случае же, когда $\bar{h}_{CA} = 0,01$ при тех же значениях режимных параметров оптимальная область смещается в зону $\bar{D} = 0,4...0,5$.

Наличие наибольшего значения η_T при изменении \bar{D} вызывается следующими факторами.

Увеличение соотношения диаметров \bar{D} сопровождается ростом кривизны межлопаточных каналов РК. Очевидно, что в этом случае возрастают потери на поворот потока в рабочей решётке. Кроме того, при увеличении \bar{D} уменьшается радиальная протяжённость лопаток, что снижает работу кориолисовых сил инерции. В итоге при увеличении \bar{D} происходит уменьшение η_T .

При уменьшении соотношения диаметров от оптимального значения тоже наблюдается снижение мощностного кпд. В этом случае определяющую роль при снижении \bar{D} играет увеличение противодавления на выходе из РК. Уменьшение \bar{D} вызывает снижение окружной скорости u_2 при одновременном повышении C_{2u} . Последнее в совокупности с недостаточностью площади выходного сечения ЦСМТ и приводит к уменьшению кпд, несмотря на увеличение работы кориолисовых сил инерции за счёт удлинения межлопаточных каналов.

Влияние параметра нагруженности на величину \bar{D}_{opt} показано на рис. 4. Оптимальное соотношение диаметров с уменьшением Y_T возрастает, причём интенсивность роста повышается с увеличением \bar{h}_{CA} . Так, при $\pi_T = 1,05$ и $\bar{h}_{CA} = 0,01$ снижение Y_T от 0,4 до 0,1 обуславливает возрастание \bar{D} от 0,45 до 0,49. При том же значении π_T , но при $\bar{h}_{CA} = 0,06$ аналогичное уменьшение параметра нагруженности вызывает увеличение \bar{D} с 0,66 до 0,8. Причиной такого поведения зависимостей $\bar{D}_{opt} = f(Y_T)$ является следующее. Величина окружной составляющей скорости потока на выходе из РК увеличивается с понижением Y_T , а это определяет повышение потерь с выходной скоростью, повышение интенсивности выходного вихря и рост противодавления на выходе из ЦСМТ. Частично компенсировать названные отрицательные факторы можно увеличением значения \bar{D}_{opt} . Уменьшение же интенсивности изменения зависимостей $\bar{D}_{opt} = f(Y_T)$ при снижении \bar{h}_{CA} объясняется тем, что большая относительная толщина пограничного слоя значительно уменьшает эффективность влияния повышения \bar{D}_{opt} .

С увеличением π_T наблюдается тенденция роста величины \bar{D}_{opt} , однако изменение \bar{D}_{opt} меньше погрешности эксперимента. Поэтому

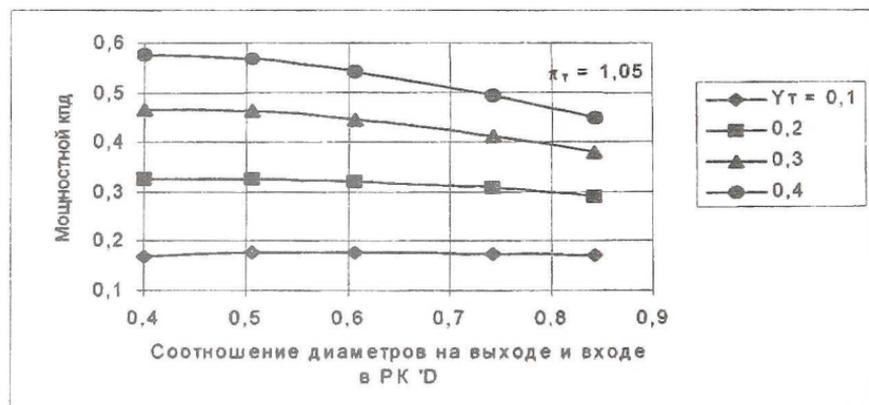
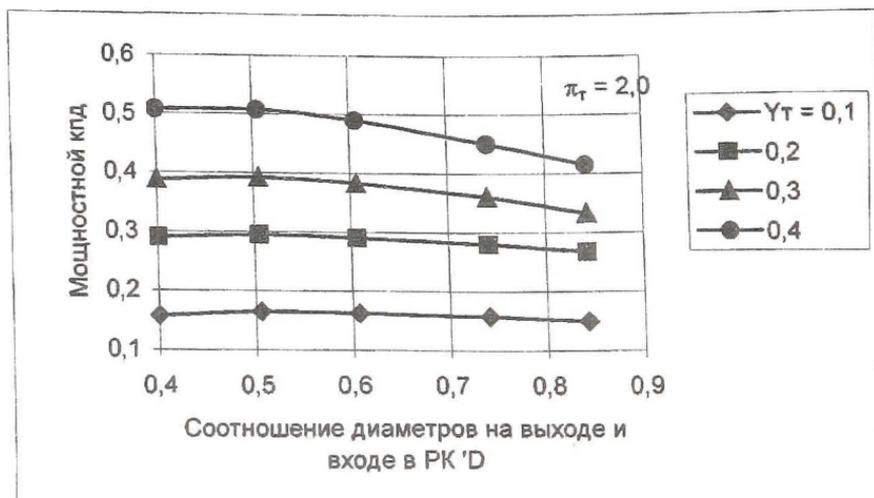


Рисунок 1 - Влияние \bar{D} на кпд при $\bar{h}_{CA} = 0,01$

можно утверждать, что оптимальное отношение диаметров на выходе и входе в РК не зависит от π_τ .

Третьим фактором, влияющим на величину \bar{D}_{opt} , является относительная высота лопаток СА. На рис. 5 показаны графики зависимости $\bar{D}_{opt} = f(\bar{h}_{CA})$ для двух крайних исследованных значений π_τ . Откуда видно, что \bar{D}_{opt} интенсивно растёт с увеличением относительной высоты лопаток. Следует отметить, что величина роста \bar{D}_{opt} практически одинакова для всех значений π_τ . Так при $\pi_\tau = 1,05$ и $Y_\tau = 0,3$ увеличение \bar{h}_{CA} от 0,01 до 0,06 вызывает повышение \bar{D}_{opt} с 0,46 до 0,71, т.е. на 0,25; а при $\pi_\tau = 2,0$ и том же значении Y_τ аналогичное

увеличение \bar{h}_{CA} приводит к росту \bar{D}_{opt} от 0,48 до 0,73, т.е. также на 0,25. Таким образом, графики $\bar{D}_{opt} = f(\bar{h}_{CA})$ подтверждают, что величина \bar{D}_{opt} практически не зависит от π_τ . В то же время с увеличением \bar{h}_{CA} величина \bar{D}_{opt} интенсивно растёт. Это объясняется тем, что с увеличением \bar{h}_{CA} возрастает расход рабочего тела через ступень и противодействие за РК. Для снижения роста противодействия за РК необходимо увеличивать \bar{D} .

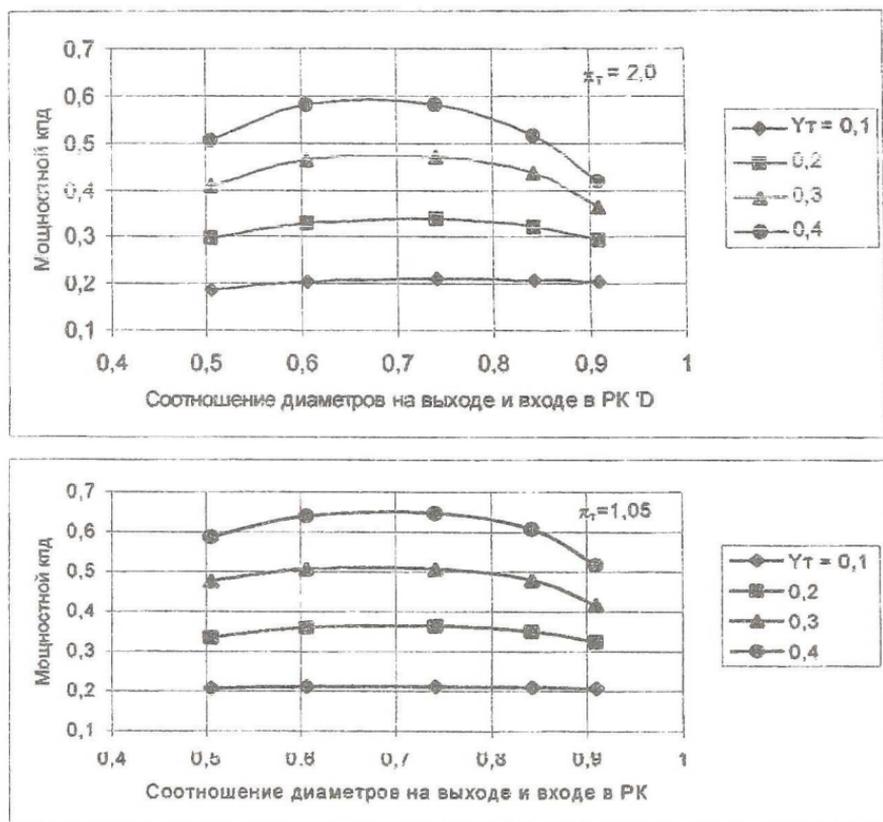


Рисунок 2 - Влияние \bar{D} на КПД при $\bar{h}_{CA} = 0,035$

Итак, проведённые исследования показали, что в диапазоне исследованных параметров $\pi_\tau = 1,05...2,0$, $Y_T = 0,1...0,4$, $\bar{h}_{CA} = 0,01...0,06$ за счёт выбора соотношения диаметров выхода и входа в РК на заданные значения Y_T и расхода (т.е. \bar{h}_{CA}) можно повысить КПД ступени до 20% (отн.).

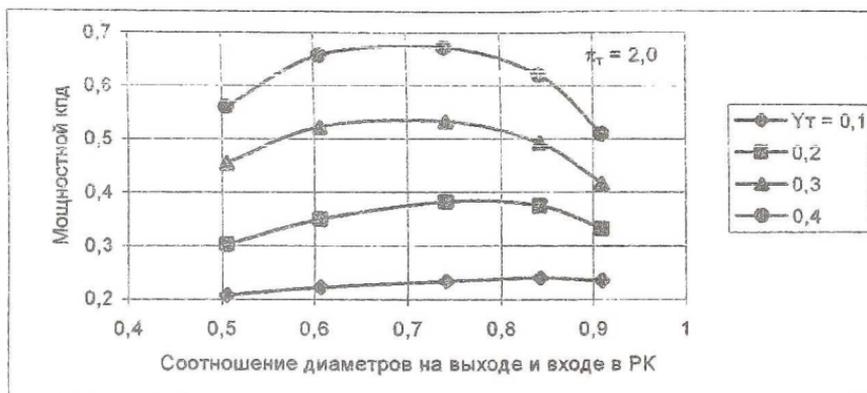
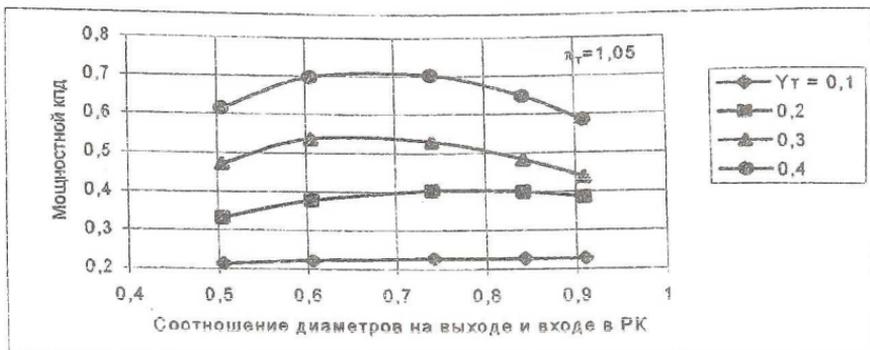


Рис. 3. Влияние \bar{D} на кпд при $\bar{h}_{CA} = 0,06$

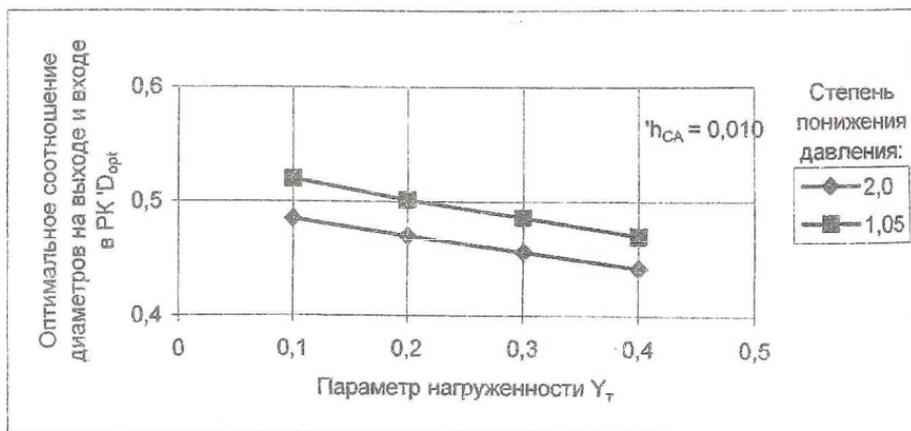




Рисунок 4 - Влияние параметра Y_T на \bar{D}_{opt}

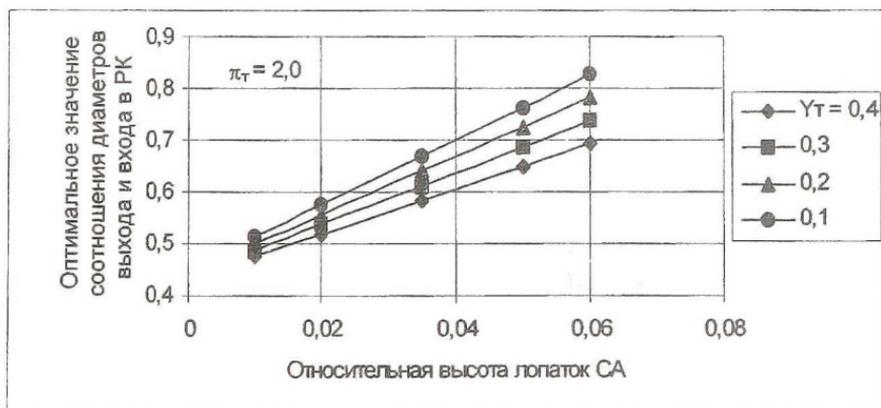
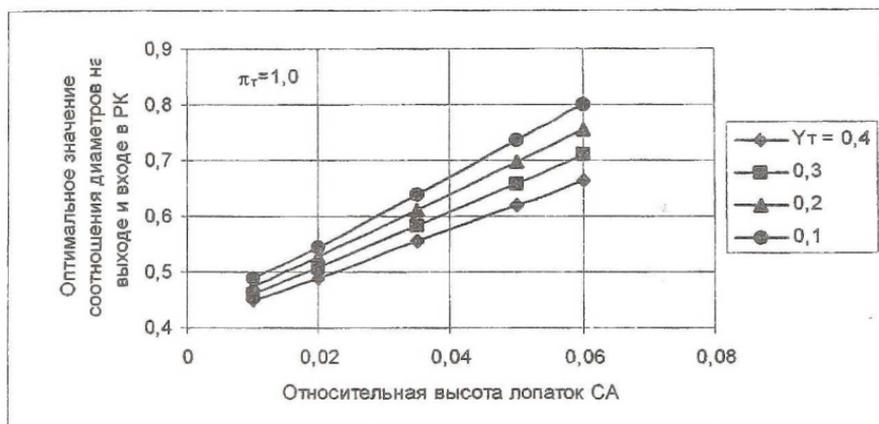


Рисунок 5 - Влияние величины \bar{h}_{CA} на \bar{D}_{opt}