

ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ
ПЕРЕКРЫШ НА КПД ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНЫХ МИКРОТУРБИН

Матвеев В.Н., Тихонов Н.Т., Сивиркин Д.В.

Проведенные исследования микротурбин различных типов [1,2,3] свидетельствуют о значительном влиянии перекрыш на их кпд, а также о наличии оптимальных значений перекрыш, обуславливающих наибольшую величину мощностного кпд η_T . В частности, за счет оптимального выбора перекрыш центростремительной микротурбины (ЦСМТ) с полуоткрытым рабочим колесом (РК) можно добиться повышения кпд на величину до 33% (отн.) [2]. Вместе с тем, перекрыши оказывают влияние и на технологичность РК. С уменьшением значений перекрыш в отдельных случаях появляется возможность снижения высоты рабочих лопаток, это в свою очередь позволяет уменьшить трудоемкость изготовления лопаточного рабочего венца и снизить число бракованных РК.

В настоящее время известны результаты экспериментальных исследований влияния перекрыш на уровень кпд ЦСМТ с закрытым и полуоткрытым РК [2,3,4]. Эксперименты были проведены в диапазонах степени понижения давления $\pi_T = 2 \dots 6$ и параметра нагруженности $y_T = 0,1 \dots 0,3$. У ЦСМТ с закрытым РК степень парциальности ϵ изменялась от 0,28 до 1, а значения относительных верхней $\bar{\Delta}_B = \Delta_B/h_{CA}$ и нижней $\bar{\Delta}_H = \Delta_H/h_{CA}$ перекрыш (см. рис. 1) варьировались соответственно в интервалах $-0,2 \dots 1,9$ и $-0,35 \dots 1,20$. В ЦСМТ с полуоткрытым РК степень парциальности изменялась от 0,17 до 1, а величины $\bar{\Delta}_B$ и $\bar{\Delta}_H$ соответственно от $-0,48$ до $0,80$ и от $0,08$ до $1,20$.

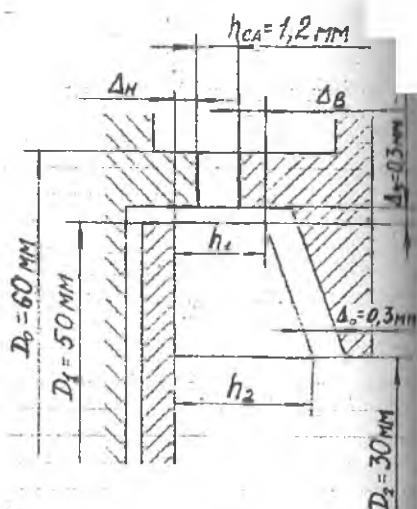
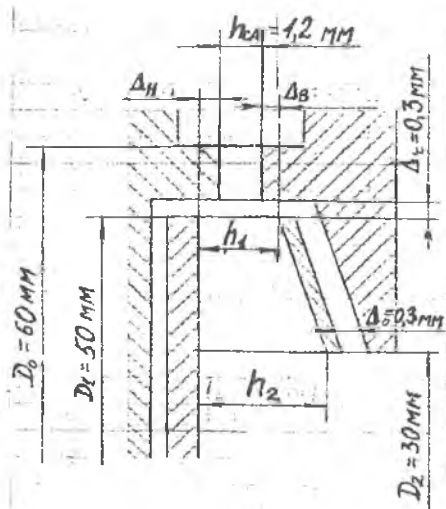
Вместе с тем, до сих пор не выполнено обобщение полученных данных в виде аппроксимирующих зависимостей, удобных для проведения

автоматизированных проектных расчетов, а также не проанализировано влияние перекрыш на кпд ЦСМТ при отступлении от оптимальных значений $\bar{\Delta}_B \text{opt}$ и $\bar{\Delta}_H \text{opt}$. Кроме того, предложенные в [2] и [3] рекомендации по выбору перекрыш не учитывают влияния последних на технологичность конструкций ЦСМТ.

Поэтому на современном этапе представляется актуальной задача получения эмпирических зависимостей, позволяющих учесть влияние относительных верхней и нижней перекрыш на кпд ЦСМТ с закрытым и полукрытым РК в эксплуатационных диапазонах режимных параметров $\pi_T = 2 \dots 6$ и $Y_T = 0,1 \dots 0,3$. Целесообразно также на базе таких зависимостей найти подходы к получению рекомендаций по выбору перекрыш с учетом технологичности РК ЦСМТ.

Для получения эмпирических зависимостей, учитывающих влияние $\bar{\Delta}_B$ и $\bar{\Delta}_H$ на кпд ЦСМТ как с закрытым, так и с полукрытым РК, экспериментальные данные работ [2,3,4] были представлены в виде двух исходных матриц со столбцами $\bar{\Delta}_B$, $\bar{\Delta}_H$, π_T , Y_T , ϵ и η_T . Исходная матрица для ЦСМТ с закрытым РК состояла из 1550 строк, а для ЦСМТ с полукрытым РК - из 3000 строк.

Первоначально была сделана попытка определения единых зависимостей $\eta_T = f(\bar{\Delta}_B; \bar{\Delta}_H)$ при фиксированных параметрах π_T , Y_T и ϵ по всей исследованной области $\bar{\Delta}_B - \bar{\Delta}_H$. Однако она привела к сложному математическому выражению. Поэтому для упрощения последнего область перекрыш $\bar{\Delta}_B - \bar{\Delta}_H$ была разбита на четыре части двумя линиями раздела $\bar{\Delta}_B = \bar{\Delta}_B \text{раз}$ и $\bar{\Delta}_H = \bar{\Delta}_H \text{раз}$ так, чтобы наибольшее значение η_T при постоянных π_T , Y_T и ϵ достигалось в подобласти $\bar{\Delta}_B < \bar{\Delta}_B \text{раз}$ и $\bar{\Delta}_H < \bar{\Delta}_H \text{раз}$. При этом оказалось, что для ЦСМТ с закрытым РК место расположения этих линий можно считать не зависящим от параметров π_T , Y_T и ϵ ($\bar{\Delta}_B \text{раз} = 0,36$ и $\bar{\Delta}_H \text{раз} = 0,25$). Для ЦСМТ с полукрытым РК на расположение линий $\bar{\Delta}_B = \bar{\Delta}_B \text{раз}$ и $\bar{\Delta}_H = \bar{\Delta}_H \text{раз}$ не оказывает влияние только параметр нагруженности Y_T :



а

б

Рис. 1. Схемы центростремительных микротурбины:

а - с закрытым РК;

б - с полукрытым РК.

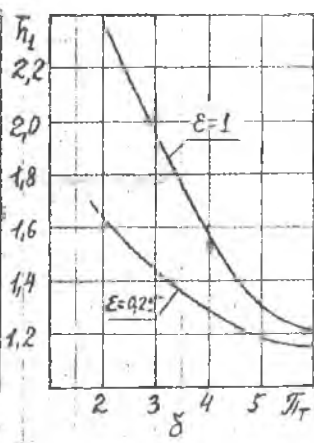
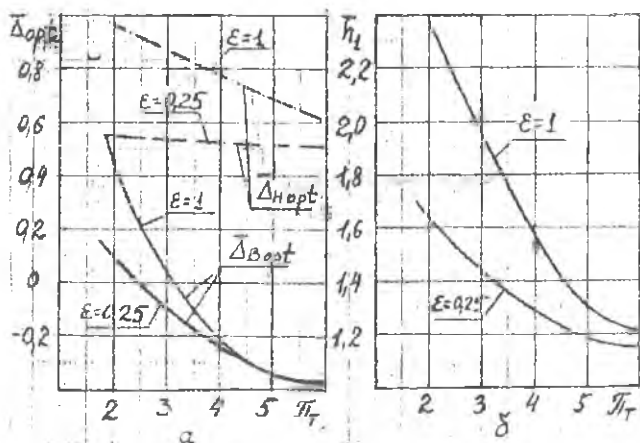


Рис. 2. Влияние π_T в ЦСМТ с полукрытым РК на:

а - оптимальные перекрышки;

б - размеры активной части сопловой струи.

$$\bar{\Delta}_{B \text{ раз}} = (0,030\pi_T^2 - 0,366\pi_T + 1,062)\varepsilon + 0,020\pi_T^2 - 0,244\pi_T + 0,408 \quad \text{и}$$

$$\bar{\Delta}_{H \text{ раз}} = (0,009\pi_T^2 - 0,159\pi_T + 0,801)\varepsilon - 0,0015\pi_T^2 + 0,026\pi_T + 0,366.$$

Таким образом были получены следующие подобласти. Для ЦСМТ с закрытым РК:

$$1) - 0,20 \leq \bar{\Delta}_B \leq 0,36 \text{ и } - 0,35 \leq \bar{\Delta}_H \leq 0,26;$$

$$2) 0,36 \leq \bar{\Delta}_B \leq 1,90 \text{ и } 0,26 \leq \bar{\Delta}_H \leq 1,20;$$

$$3) 0,36 < \bar{\Delta}_B < 1,90 \text{ и } - 0,35 < \bar{\Delta}_H < 0,26;$$

$$4) - 0,20 < \bar{\Delta}_B < 0,36 \text{ и } 0,26 < \bar{\Delta}_H < 1,20.$$

Для ЦСМТ с полукрытым РК:

$$1) - 0,48 \leq \bar{\Delta}_B \leq \bar{\Delta}_{B \text{ раз}} \text{ и } 0,08 \leq \bar{\Delta}_H \leq \bar{\Delta}_{H \text{ раз}};$$

$$2) \bar{\Delta}_{B \text{ раз}} \leq \bar{\Delta}_B \leq 0,80 \text{ и } \bar{\Delta}_{H \text{ раз}} \leq \bar{\Delta}_H \leq 1,20;$$

$$3) \bar{\Delta}_{B \text{ раз}} < \bar{\Delta}_B < 0,80 \text{ и } 0,08 < \bar{\Delta}_H < \bar{\Delta}_{H \text{ раз}};$$

$$4) - 0,48 < \bar{\Delta}_B < \bar{\Delta}_{B \text{ раз}} \text{ и } \bar{\Delta}_{H \text{ раз}} < \bar{\Delta}_H < 1,20.$$

В первой подобласти экспериментальные данные хорошо описываются уравнением параболоида. Однако имевшиеся в распоряжении экспериментальные данные работ [2] и [3] дали поверхность отклика для ряда сочетаний значений π_T и ε в виде гиперболического параболоида, что противоречит физической картине влияния перекрыш на мод. Поэтому пришлось провести дополнительные экспериментальные исследования ЦСМТ с закрытым и полукрытым РК.

При подготовке дополнительных экспериментов было изготовлено четыре закрытых и три полукрытых РК. Значения перекрыш ЦСМТ с закрытым РК были выбраны из условия обеспечения наименьшей погрешности аппроксимации уравнением поверхности второго порядка и соответственно равнялись: $\bar{\Delta}_B = -0,1$ и $\bar{\Delta}_H = -0,25$; $\bar{\Delta}_B = -0,1$ и $\bar{\Delta}_H = 0,15$; $\bar{\Delta}_B = 0,26$ и $\bar{\Delta}_H = 0,25$; $\bar{\Delta}_B = 0,26$ и $\bar{\Delta}_H = 0,15$. У ЦСМТ с полукрытым РК величина верхней перекрыши была принята наименьшей из исследованного диапазона $\bar{\Delta}_B = -0,48$, а перекрыши

$\bar{\Delta}_H$ равнялась соответственно в трех ЦСМТ 0,05; 0,30 и 0,50.

Экспериментальные исследования этих ЦСМТ проводились в диапазонах режимных параметров $\pi_T = 2...6$ и $Y_T = 0,1...0,3$. Закрытые РК испытывались совместно с СА при $\epsilon = 0,286; 0,5; 0,714$ и 1, а полукрытые РК - при $\epsilon = 0,167; 0,267; 0,5; 0,767$ и 1. Таким образом, в исходные матрицы для ЦСМТ с закрытым и полукрытым РК было дописано соответственно 240 и 225 строк.

При обработке исходные матрицы были разбиты на блоки с фиксированными параметрами π_T, Y_T, ϵ в соответствии с установленными выше подобластями $\bar{\Delta}_B - \bar{\Delta}_H$. Для каждой подобласти $\bar{\Delta}_B - \bar{\Delta}_H$ были составлены уравнения регрессии $\eta_T = f(\bar{\Delta}_B, \bar{\Delta}_H)$ при постоянных значениях π_T, Y_T и ϵ . Оказалось, что для аппроксимации экспериментальных данных во второй подобласти $\bar{\Delta}_B \geq \bar{\Delta}_{B\text{раз}}$ и $\bar{\Delta}_H \geq \bar{\Delta}_{H\text{раз}}$ можно использовать уравнения плоскости, а в остальных подобластях $\bar{\Delta}_B - \bar{\Delta}_H$ необходимы уравнения второго порядка. Причем наибольшее значение кпд η_T^H при фиксированных π_T, Y_T и ϵ находится в первой подобласти $\bar{\Delta}_B \leq \bar{\Delta}_{B\text{раз}}$ и $\bar{\Delta}_H \leq \bar{\Delta}_{H\text{раз}}$.

С целью унификации полученных зависимостей $\eta_T = f(\bar{\Delta}_B, \bar{\Delta}_H)$ в каждом блоке исходных матриц последний столбец η_T был заменен на столбец относительного кпд $\bar{\eta}_\Delta = \eta_T / \eta_T^H$.

Анализ модифицированной таким образом матрицы ЦСМТ с закрытым РК показал, что влияние параметров π_T, Y_T и ϵ на $\bar{\eta}_\Delta$ не превышает 4%, т.е. погрешности определения $\bar{\eta}_\Delta$ экспериментальным путем. Поэтому в дальнейшем рассматривалось влияние на $\bar{\eta}_\Delta$ ЦСМТ с закрытым РК только относительных перекрытий без учета изменения параметров π_T, Y_T и ϵ .

В отличие от ЦСМТ с закрытым РК в ЦСМТ с полукрытым РК есть возможность пренебречь влиянием на $\bar{\eta}_\Delta$ только параметра нагруженности Y_T . Влияние π_T и ϵ на относительный кпд необходимо учесть при составлении аппроксимирующих выражений.

В результате обработки [5] модифицированной матрицы ЦСМТ с открытым РК были получены следующие регрессионные модели. В первой подобласти $\bar{\Delta}_B - \bar{\Delta}_H$ экспериментальные данные были описаны с помощью уравнения эллиптического параболоида:

$$\bar{\eta}_{\Delta} = A' \bar{\Delta}_B^2 + B' \bar{\Delta}_H^2 + C' \bar{\Delta}_B \bar{\Delta}_H + D' \bar{\Delta}_B + E' \bar{\Delta}_H + F',$$

где $A' = -0,2322$; $B' = -0,2685$; $C' = -0,3503$; $D' = 0,2502$; $E' = 0,2571$ и $F' = 0,9241$.

Во второй подобласти подобрано уравнение плоскости:

$$\bar{\eta}_{\Delta} = 1,028 - 0,0425 \bar{\Delta}_B - 0,0518 \bar{\Delta}_H.$$

А в третьей и четвертой подобласти соответственно выражения:

$$\bar{\eta}_{\Delta} = 0,998 - 0,269 \bar{\Delta}_H^2 + 0,134 \bar{\Delta}_H - 0,0425 \bar{\Delta}_B \quad \text{и}$$

$$\bar{\eta}_{\Delta} = 0,985 - 0,232 \bar{\Delta}_B^2 + 0,163 \bar{\Delta}_B - 0,0518 \bar{\Delta}_H.$$

Аналогично для ЦСМТ с полуоткрытым РК в первой подобласти:

$$\bar{\eta}_{\Delta} = A \bar{\Delta}_B^2 + B \bar{\Delta}_H^2 + C \bar{\Delta}_B \bar{\Delta}_H + D \bar{\Delta}_B + E \bar{\Delta}_H + F,$$

где $A = -0,00292 \pi_T^2 - 1,600 \varepsilon^2 - 0,0906 \pi_T \varepsilon - 0,00565 \pi_T + 2,789 \varepsilon - 1,068$;

$$B = 0,00145 \pi_T^2 - 0,578 \varepsilon^2 - 0,124 \pi_T \varepsilon + 0,0332 \pi_T + 2,219 \varepsilon - 1,538$$
;

$$C = -0,536 \varepsilon^2 + 0,329 \pi_T \varepsilon - 0,292 \pi_T - 0,165 \varepsilon + 0,493$$
;

$$E = -0,00632 \pi_T^2 + 0,0317 \varepsilon^2 + 0,223 \pi_T \varepsilon - 0,101 \pi_T - 1,668 \varepsilon + 1,613$$
;

$$F = -0,00464 \pi_T^2 + 0,0139 \varepsilon^2 - 0,0579 \pi_T \varepsilon + 0,0723 \pi_T + 0,320 \varepsilon + 0,525$$
;

$$D = m \varepsilon^3 + n \varepsilon^2 + l \varepsilon + k.$$

В последнем выражении

$$m = 0,101 \pi_T^2 - 1,256 \pi_T + 3,827$$
;

$$n = 2,48 \cdot 10^{-3} \pi_T^3 - 0,117 \pi_T^2 + 1,177 \pi_T - 4,289$$
;

$$\ell = 1,75 \cdot 10^{-4} \pi_T^4 + 4,95 \cdot 10^{-3} \pi_T^3 - 0,149 \pi_T^2 + 0,861 \pi_T - 0,343;$$

$$k = 1,17 \cdot 10^{-4} \pi_T^4 - 1,63 \cdot 10^{-3} \pi_T^3 + 5,08 \cdot 10^{-2} \pi_T^2 - 0,423 \pi_T + 0,690.$$

Во второй подобласти для ЦМТ с полукрытым Рн

$$\bar{\eta}_\Delta = R \bar{\Delta}_B + S \bar{\Delta}_H + T,$$

где

$$R = 0,0125 \varepsilon - 0,0705;$$

$$S = 0,0521 \varepsilon^2 - 0,0320 \varepsilon - 0,0881;$$

$$T = 2,73 \cdot 10^{-3} \pi_T^2 - 4,74 \cdot 10^{-2} \varepsilon^2 - 1,22 \cdot 10^{-2} \pi_T \varepsilon - 2,71 \cdot 10^{-2} \pi_T + 0,122 \varepsilon + 1,082.$$

А в третьей и четвертой подобласти соответственно:

$$\bar{\eta}_\Delta = B \bar{\Delta}_H^2 + R \bar{\Delta}_B - P \bar{\Delta}_H + G \quad \text{и}$$

$$\bar{\eta}_\Delta = A \bar{\Delta}_B^2 + S \bar{\Delta}_H - Q \bar{\Delta}_B + H,$$

где

$$P = 5,67 \cdot 10^{-3} \pi_T^2 - 2,79 \cdot 10^{-2} \varepsilon^2 - 0,129 \pi_T \varepsilon + 4,67 \cdot 10^{-3} \pi_T + 1,47 \varepsilon - 1,39;$$

$$G = 5,20 \cdot 10^{-3} \pi_T^2 + 0,178 \varepsilon^2 - 3,62 \cdot 10^{-2} \pi_T \varepsilon - 3,37 \cdot 10^{-2} \pi_T + 0,132 \varepsilon + 0,749;$$

$$Q = 2,31 \cdot 10^{-3} \pi_T^2 + 0,527 \varepsilon^2 - 7,12 \cdot 10^{-2} \pi_T \varepsilon + 0,162 \pi_T - 0,526 \varepsilon - 0,261;$$

$$H = -5,91 \cdot 10^{-3} \pi_T^2 - 0,160 \varepsilon^2 + 6,95 \cdot 10^{-3} \pi_T \varepsilon + 1,97 \cdot 10^{-2} \pi_T + 0,186 \varepsilon + 0,994.$$

Дисперсионный анализ этих зависимостей показывает, что коэффициент множественной корреляции для каждого уравнения не меньше 0,673. Вычисленные значения чисел Стьюдента t для каждого коэффициента уравнения регрессии превышают критическое значение числа t , взятого из таблицы распределения для 95%-ного уровня доверительной вероятности [5]. Это означает, что коэффициенты регрессии являются значимыми. Проверка адекватности регрессионных моделей была проведена с помощью F -критерия. Вычисленное наибольшее значение критерия F для приведенных выше уравнений регрессии равно 0,196. Это

более, чем в пять раз меньше даже минимального табличного значения $F = 1$. Поэтому полученные уравнения можно считать не только статистически значимыми, но и вполне пригодными для удовлетворительного предсказания величины $\overline{\eta}_\Delta$ [5].

В дальнейшем было проведено исследование полученных регрессионных моделей. В первую очередь определялись оптимальные величины относительных перекрыш. Для ЦСМТ с закрытым РК последние оказались равны $\overline{\Delta}_{B\text{opt}} = 0,36$ и $\overline{\Delta}_{H\text{opt}} = 0,26$. У ЦСМТ с полуоткрытым РК значения $\overline{\Delta}_{B\text{opt}}$ и $\overline{\Delta}_{H\text{opt}}$ зависят от π_T и ε . Их можно найти при решении системы двух уравнений, получаемых при дифференцировании зависимости $\overline{\eta}_\Delta = f(\overline{\Delta}_B, \overline{\Delta}_H)$ для первой подобласти по $\overline{\Delta}_B$ и $\overline{\Delta}_H$. в виде

$$\overline{\Delta}_{B\text{opt}} = (CE - 2BD) / (4AB - C^2);$$

$$\overline{\Delta}_{H\text{opt}} = (CD - 2AE) / (4AB - C^2).$$

Значения $\overline{\Delta}_{B\text{opt}}$ и $\overline{\Delta}_{H\text{opt}}$ для $\varepsilon = 1$ и $0,25$ представлены на рис. 2 в зависимости от π_T .

Сравнивая значения оптимальных перекрыш ЦСМТ с закрытым и полуоткрытым РК, следует отметить, что в последнем типе ЦСМТ практически во всем исследованном диапазоне режимных и геометрических параметров $\overline{\Delta}_{B\text{opt}}$ меньше, а $\overline{\Delta}_{H\text{opt}}$ больше, чем у ЦСМТ с закрытым РК. Это свидетельствует о смещении сопловой струи в сторону нижней перекрыши в ЦСМТ с полуоткрытым РК. Последнее можно объяснить следующим.

При сверхзвуковом обтекании рабочих лопаток скачки уплотнения взаимодействуют со срывными зонами на периферии лопаток, увеличивают их размеры и нарушают плавное обтекание профилей в этой области. Поэтому в периферийной области лопаток велики потери из-за срывных зон и скачков уплотнений. Вместе с тем, срывные вихревые зоны, закрывая часть межлопаточного канала, смещают струю на входе в полуоткрытое РК в сторону нижней перекрыши. В ЦСМТ с закрытым РК

этот эффект отсутствует, так как нет периферийных среженных зон благодаря установке крышки на лопатки РК.

Как следует из зависимости для $\bar{\Delta}_B^{opt}$ (см. рис. 2,а) с ростом π_T величина $\bar{\Delta}_B^{opt}$ уменьшается, принимая с $\pi_T = 2,5 \dots 3,0$ отрицательные значения. Причины такого явления уже были объяснены в работе [3]. Дополнительно можно ответить, что при увеличении π_T интенсивность взаимодействия скачков уплотнения с вихревыми зонами увеличивается, и следовательно, в межлопаточных каналах расширяется зона потока с повышенными потерями на периферии лопаток. Поэтому уменьшение $\bar{\Delta}_B$ в этом случае позволяет уменьшить размеры неблагоприятной зоны течения в межлопаточных каналах. При этом возможны вихри с периферии лопаток частично вытесняются сверхзвуковым потоком в осевой зазор.

Уменьшение значения $\bar{\Delta}_H^{opt}$ с ростом π_T в ЦСМТ с полуоткрытым РК объясняется в работе [2] уменьшением размеров струи в меридиональной плоскости из-за снижения толщины пограничного слоя в межлопаточных сопловых каналах. В результате, с учетом изменения $\bar{\Delta}_B^{opt}$ и $\bar{\Delta}_H^{opt}$ относительные размеры активной части струи газа в меридиональной плоскости на входе в полуоткрытое РК $\bar{h}_1 = h_1/h_{CA} = (1 + \bar{\Delta}_B^{opt} + \bar{\Delta}_H^{opt})$ с ростом π_T уменьшаются (см. рис. 2,б).

К некоторому уменьшению \bar{h}_1 приводит и снижение степени парциальности (рис. 2,б). Как отмечалось в работе [4] это происходит потому, что при уменьшении высоты лопаток РК (т.е. при уменьшении $\bar{\Delta}_B$ и $\bar{\Delta}_H$) в парциальных турбинах уменьшаются потери на вентиляцию и выколачивание.

Полученные зависимости $\bar{\eta}_\Delta = f(\bar{\Delta}_B; \bar{\Delta}_H)$ позволили найти области значений $\bar{\Delta}_B$ и $\bar{\Delta}_H$, в которых снижение $\bar{\eta}_\Delta$ не превышает 4,6, 8 и 10%. Часть таких областей приведена на рис. 3. Они свидетельствуют о наибольшей интенсивности снижения $\bar{\eta}_\Delta$ при уменьшении $\bar{\Delta}_B$ и $\bar{\Delta}_H$ в первой подобласти $\bar{\Delta}_B - \bar{\Delta}_H$.

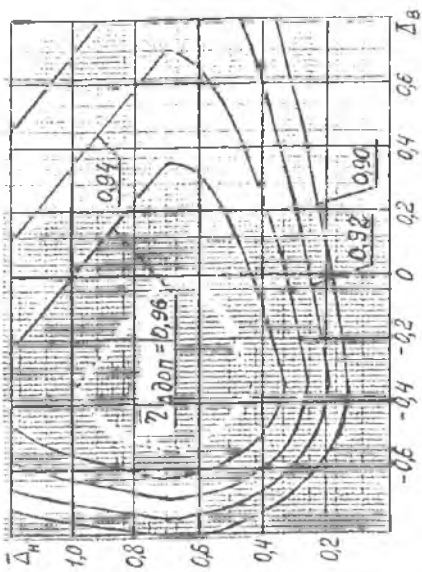
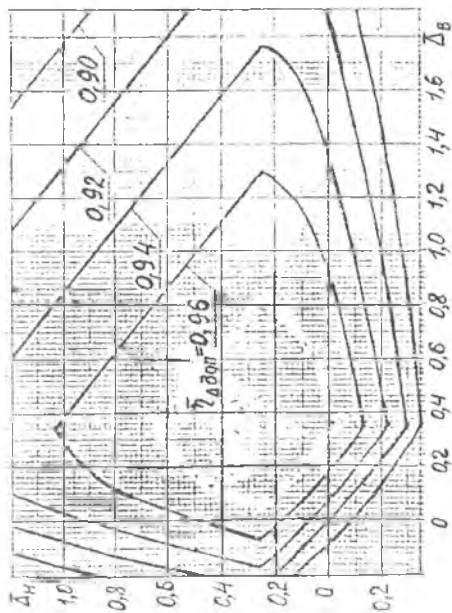


Рис. 3. Области перекрытия с различными допустимыми значениями снижения уровня код:

а - для ЦСМТ с закрытым РК;

б - для ЦСМТ с полукрытым РК при $\bar{\mu}_T = 5$ и $\epsilon = 1$.

При заданном допустимом уровне снижения относительного КПД $\eta_{\Delta\text{дон}}$ в этой подобласти $\bar{\Delta}_B - \bar{\Delta}_H$ граничный контур определяется выражением

$$\bar{\Delta}_{H\text{гр}} = \frac{-(E + C\bar{\Delta}_{B\text{гр}}) - \sqrt{(E + C\bar{\Delta}_{B\text{гр}})^2 - 4B(A\bar{\Delta}_{B\text{гр}}^2 + D\bar{\Delta}_{B\text{гр}} + F - \eta_{\Delta\text{дон}})}}{2B}$$

На граничной линии можно найти такое сочетание $\bar{\Delta}_B$ и $\bar{\Delta}_H$, которое обеспечит наименьшее значение высоты лопатки на входе в РК $h_1 = h_{\text{СА}}(1 + \bar{\Delta}_B + \bar{\Delta}_H)$, а следовательно, и на выходе из него h_2 . Наименьшее же значение h_2 обуславливает наименьшую трудоемкость изготовления лопаточного венца РК при заданном допустимом уровне снижения КПД.

Для определения такого рационального сочетания перекрыш $\bar{\Delta}_B$ рац и $\bar{\Delta}_H$ рац следует воспользоваться условием минимума суммы $\bar{\Delta}_B + \bar{\Delta}_H$ на граничной линии. Эти значения перекрыш обеспечивают наименьшую трудоемкость изготовления рабочих лопаточных венцов ЦСМТ.

Выражения для рациональных перекрыш, полученные предложенным способом, имеют следующий вид:

$$\bar{\Delta}_{H\text{рац}} = \frac{-V - \sqrt{V^2 - 4uW}}{2u};$$

$$\bar{\Delta}_{B\text{рац}} = \frac{-(C\bar{\Delta}_{H\text{рац}} + D) + \sqrt{(C\bar{\Delta}_{H\text{рац}} + D)^2 - 4A(B\bar{\Delta}_{H\text{рац}}^2 + E\bar{\Delta}_{H\text{рац}} + F - \eta_{\Delta\text{дон}})}}{2A},$$

где

$$u = C^4 - 8ABC^2 + 16A^2B^2 - (2A - C)^2C^2 + 4AB(2A - C)^2;$$

$$V = 2C^3D - 8ABCD - 4AEC^2 + 16A^2BE - 2CD(2A - C)^2 + 4AE(2A - C)^2;$$

$$W = C^2D^2 - 4ACDE + 4A^2E^2 - (2A - C)^2D^2 + 4A(2A - C)^2(F - \eta_{\Delta\text{дон}}).$$

Подсчитанные таким образом значения рациональных относительных перекрыш в зависимости от допустимого уровня снижения КПД для ЦСМТ с закрытым и полустырытым РК приведены на рис. 4. В частности, для ЦСМТ с закрытым РК при $\eta_{\Delta\text{дон}} = 0,96$ рациональные относительные пере-

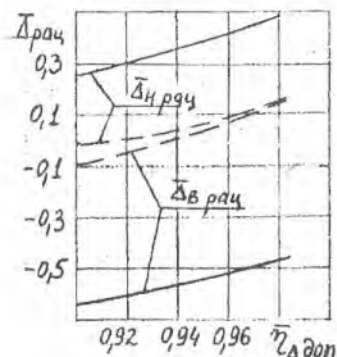


Рис. 4. Значения рациональных перекрыш в зависимости от допустимого уровня снижения кпд:

---- для ЦСМТ с закрытым РК;

— для ЦСМТ с полуоткрытым РК при $\pi_T = 5$ и $\epsilon = 1$

крыши равны $\bar{\Delta}_{Врац} = 0,08$ и $\bar{\Delta}_{Нрац} = 0,09$ при $\bar{\Delta}_{Ворт} = 0,35$ и $\bar{\Delta}_{Норт} = 0,25$, а для ЦСМТ с полуоткрытым РК при $\pi_T = 5$, $\epsilon = 1$ и том же $\bar{\eta}_{\Delta доп}$ следует принимать $\bar{\Delta}_{Врац} = -0,52$ и $\bar{\Delta}_{Нрац} = 0,42$ при $\bar{\Delta}_{Ворт} = -0,33$ и $\bar{\Delta}_{Норт} = 0,69$.

В заключение следует отметить, что на основании приведенных выше регрессионных моделей и методик определения относительного кпд $\bar{\eta}_{\Delta}$, оптимальных и рациональных перекрыш составлены и отлажены программы расчета на ЭВМ для проектирования ЦСМТ с закрытым и полуоткрытым РК.

Таким образом, выполненные исследования и проведенные обобщения результатов экспериментов позволили получить для ЦСМТ с закрытым РК "статистически значимые" аппроксимирующие выражения $\bar{\eta}_{\Delta} = f(\bar{\Delta}_В; \bar{\Delta}_Н)$, в области $\pi_T = 2...6$; $Y_T = 0,1...0,3$; $\epsilon = 0,28...1,0$; $\bar{\Delta}_В = -0,20...1,90$ и $\bar{\Delta}_Н = -0,35...1,20$. Для ЦСМТ с полуоткрытым РК получены аналогичные выражения в виде $\bar{\eta}_{\Delta} = f(\bar{\Delta}_В; \bar{\Delta}_Н; \pi_T; \epsilon)$, справедливые в диапазонах $\pi_T = 2...6$; $Y_T = 0,1...0,3$; $\epsilon = 0,12...1,0$; $\bar{\Delta}_В = -0,48...0,80$ и $\bar{\Delta}_Н = 0,08...1,20$.

Кроме того предложен подход к выбору перекрыш с учетом не только уровня получаемого КПД, но и технологичности РК. Разработаны рекомендации и программы расчета по определению оптимальных и рациональных значений перекрыш.

Литература

1. Мусаткин Н.Ф., Тихонов Н.Т. Влияние верхней и нижней перекрыш на КПД парциальной осевой воздушной микротурбины // Изв. вузов. Авиационная техника, 1979. - №3 - С. 106 - 108.
2. Тихонов Н.Т., Тихонов А.Н., Грачева С.М. Экспериментальное исследование влияния величины верхней и нижней перекрыш на экономичность воздушных центробежных микротурбин с полным подводом // Изв. вузов. Авиационная техника, 1983. - №3, - С.42-46.
3. Тихонов Н.Т., Матвеев В.Н. Экспериментальное исследование влияния величин верхней и нижней перекрыш на экономичность радиальных центробежных микротурбин с закрытым рабочим колесом // Изв. вузов. Авиационная техника, 1987. - №4. - С. 92-94.
4. Тихонов Н.Т., Тихонов А.Н. Влияние величины верхней и нижней перекрыш на экономичность радиальных центробежных воздушных микротурбин с парциальным подводом // Изв. вузов. Авиационная техника, 1986. - №4. - С. 59-63.
5. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. Пер. с англ. - М.: Финансы и статистика, 1986. - 366 с.