

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  $\eta_T$ . 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  $\epsilon$  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  $1,20$ .

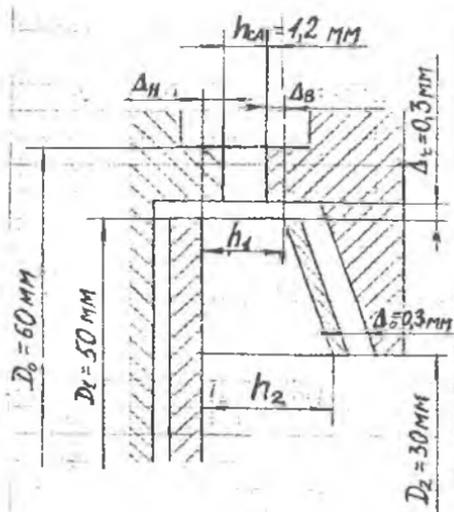
Вместе с тем, до сих пор не выполнено обобщение полученных данных в виде аппроксимирующих зависимостей, удобных для проведения

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.

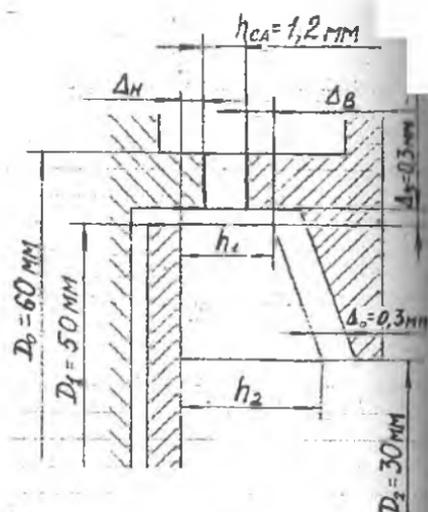
Поэтому на современном этапе представляется актуальной задача получения эмпирических зависимостей, позволяющих учесть влияние относительных верхней и нижней перекрыш на кпд ЦСМТ с закрытым и полукрытым РК в эксплуатационных диапазонах режимных параметров  $\pi_T = 2 \dots 6$  и  $Y_T = 0,1 \dots 0,3$ . 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  $\bar{\Delta}_B$ ,  $\bar{\Delta}_H$ ,  $\pi_T$ ,  $Y_T$ ,  $\epsilon$  и  $\eta_T$ . 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  $\pi_T$ ,  $Y_T$  и  $\epsilon$  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  $\eta_T$  при постоянных  $\pi_T$ ,  $Y_T$  и  $\epsilon$  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  $\pi_T$ ,  $Y_T$  и  $\epsilon$  ( $\bar{\Delta}_B \text{раз} = 0,36$  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.

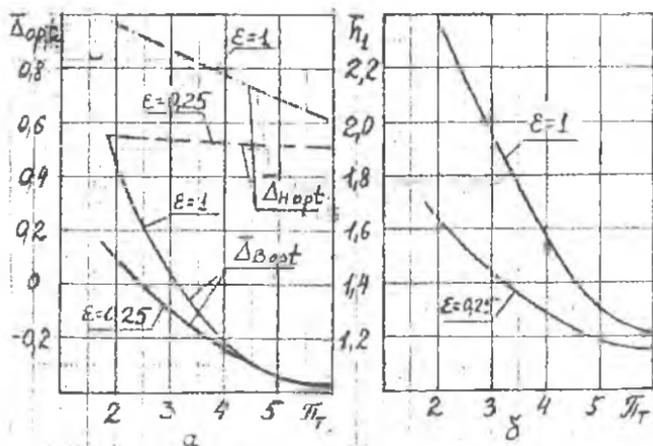


Рис. 2. Влияние  $\Pi_T$  в ЦСМТ с полукрытым РК на:

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  $\pi_T$  и  $\varepsilon$  в виде гиперболического параболоида, что противоречит физической картине влияния перекрытия 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 перекрытия 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 перекрышки была принята наименьшей из исследованного диапазона  $\bar{\Delta}_B = -0,48$ , а перекры-

$\bar{\Delta}_H$  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  $\pi_T, Y_T, \epsilon$  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  $\pi_T, Y_T$  и  $\epsilon$ . Оказалось, что для аппроксимации экспериментальных данных во второй подобласти  $\bar{\Delta}_B \geq \bar{\Delta}_{Bраз}$  и  $\bar{\Delta}_H \geq \bar{\Delta}_{Hраз}$  можно использовать уравнения плоскости, а в остальных подобластях  $\bar{\Delta}_B - \bar{\Delta}_H$  необходимы уравнения второго порядка. Причем наибольшее значение кпд  $\eta_T^H$  при фиксированных  $\pi_T, Y_T$  и  $\epsilon$  находится в первой подобласти  $\bar{\Delta}_B \leq \bar{\Delta}_{Bраз}$  и  $\bar{\Delta}_H \leq \bar{\Delta}_{Hраз}$ .

С целью унификации полученных зависимостей  $\eta_T = f(\bar{\Delta}_B, \bar{\Delta}_H)$  в каждом блоке исходных матриц последний столбец  $\eta_T$  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  $\pi_T, Y_T$  и  $\epsilon$  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 перекири без учета изменения параметров  $\pi_T, Y_T$  и  $\epsilon$ .

В отличие от ЦСМТ с закрытым РК в ЦСМТ с полукрытым РК есть возможность пренебречь влиянием на  $\bar{\eta}_\Delta$  только параметра нагруженности  $Y_T$ . В влияние  $\pi_T$  и  $\epsilon$  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 полукритичным Ph

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

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  $\pi_T$  и  $\varepsilon$ . 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  $\pi_T$ .

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  $\pi_T$  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  $\pi_T$  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 возможно вихри с периферии лопаток частично вытесняются сверхзвуковым потоком в осевой зазор.

Уменьшение значения  $\bar{\Delta}_H^{opt}$  с ростом  $\pi_T$  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  $\pi_T$  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  $\bar{\Delta}_B - \bar{\Delta}_H$ .

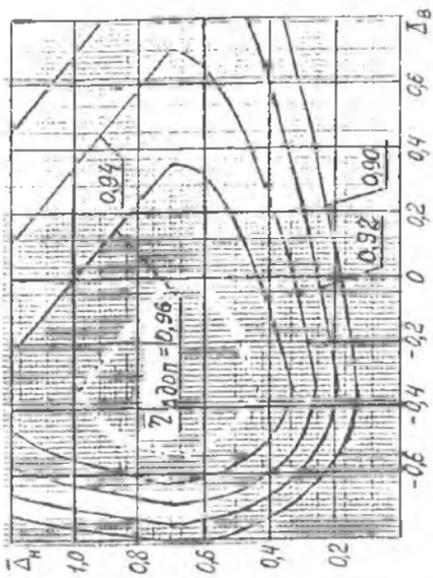
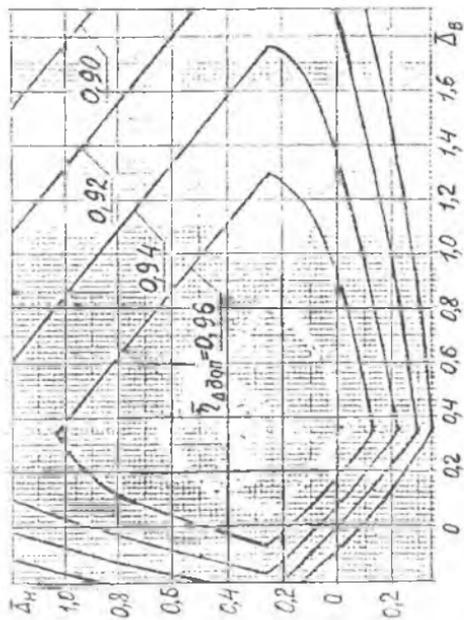


Рис. 3. Области перекрытия с различными допустимыми значениями снижения уровня код:

а - для ЦСМТ с закрытым РК;

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

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

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

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:

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

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

где

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

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

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

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  $\eta_{\Delta\text{доп}} = 0,96$  рациональные относительные пере-

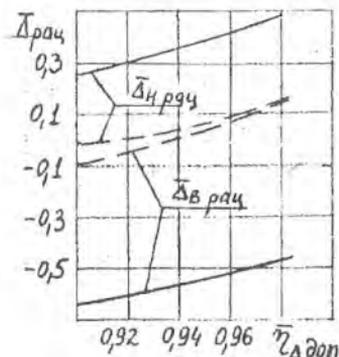


Рис. 4. Значения рациональных перекрыш в зависимости от допустимого уровня снижения кпд:

---- для ЦСМТ с закрытым РК;

— для ЦСМТ с полуоткрытым РК при  $\bar{\pi}_T = 5$  и  $\bar{\epsilon} = 1$

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

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  $\bar{\eta}_{\Delta} = f(\bar{\Delta}_{\text{В}}; \bar{\Delta}_{\text{Н}})$ , в области  $\bar{\pi}_T = 2 \dots 6$ ;  $\bar{y}_T = 0,1 \dots 0,3$ ;  $\bar{\epsilon} = 0,28 \dots 1,0$ ;  $\bar{\Delta}_{\text{В}} = -0,20 \dots 1,90$  и  $\bar{\Delta}_{\text{Н}} = -0,35 \dots 1,20$ . Для ЦСМТ с полуоткрытым РК получены аналогичные выражения в виде  $\bar{\eta}_{\Delta} = f(\bar{\Delta}_{\text{В}}; \bar{\Delta}_{\text{Н}}; \bar{\pi}_T; \bar{\epsilon})$ , справедливые в диапазонах  $\bar{\pi}_T = 2 \dots 6$ ;  $\bar{y}_T = 0,1 \dots 0,3$ ;  $\bar{\epsilon} = 0,12 \dots 1,0$ ;  $\bar{\Delta}_{\text{В}} = -0,48 \dots 0,80$  и  $\bar{\Delta}_{\text{Н}} = 0,08 \dots 1,20$ .

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.