

УДК 621.165

А. В. ЛАПУЗИН, канд. техн. наук, доц.; доц. НТУ «ХПИ»;
В. П. СУББОТОВИЧ, д-р техн. наук, с.н.с.; проф. НТУ «ХПИ»;
Ю. А. ЮДИН, канд. техн. наук, доц.; проф. НТУ «ХПИ»;
А. Ю. ЮДИН, канд. техн. наук, с.н.с.; доц. НТУ «ХПИ»;
В. Л. ШВЕЦОВ, канд. техн. наук; главный конструктор паровых
 и газовых турбин ОАО «Турбоатом», Харьков;
И. И. КОЖЕШКУРТ, начальник отдела ОАО «Турбоатом», Харьков;
В. А. КОНЕВ, начальник сектора ОАО «Турбоатом», Харьков

ОБ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕТОК ПРОФИЛЕЙ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Проведено обобщение и анализ результатов собственных и привлеченных экспериментальных исследований решеток профилей сопловых лопаток, которые показали положительное влияние на аэродинамическое совершенство решеток удлинителей к стандартным профилям. Экспериментально доказано, что для решетки с относительно короткими лопатками оптимальное проектирование поворотных частей межлопаточных каналов с помощью обратной аэродинамической задачи позволило существенно уменьшить суммарные потери за счет доли концевых потерь.

Ключевые слова: решетка сопловых профилей, удлинитель, концевые и профильные потери, напряжения в лопатках, обратная аэродинамическая задача.

Введение

Малые высоты сопловых лопаток (l) и большие осевые усилия, действующие на диафрагмы ЦВД мощных паровых турбин, приводят к необходимости увеличивать осевую ширину решеток B (рис. 1а), что является одной из основных причин высоких концевых потерь ζ_k в решетках сопловых лопаток без удлинителей. Для снижения концевых потерь в турбине К-300-240 выпуска 1960 г. Харьковский турбинный завод использовал диафрагму с узкими направляющими лопатками (осевая ширина которых B_x значительно меньше B , рис. 1б) и силовыми стойками [1], а в турбине К-300-240-2 выпуска 1970 г. стал применять профили с удлиненной входной частью типа Н4У (рис. 1в). Аэродинамические характеристики прямых пакетов профилей типа Н4У приведены в отраслевом стандарте [2]. 20 типоразмеров стандартных профилей отличаются относительным удлинением входной части $\bar{L} = (B - B_x)/b_x$, а также абсолютными размерами исходного профиля, а именно: b_x – хордой исходного профиля, B_x – осевой шириной решетки исходных профилей. Огромный объем исследований прямых пакетов решеток и ступеней с профилями типа Н4У выполнен в ОАО «Турбоатом», НТУ «ХПИ» [3] и НПО ЦКТИ [2].

Цель исследования

Целью исследования является определение области применения стандартных решеток типа Н4, Н4У и решеток с волнообразной формой профиля, а также количественная оценка влияния формы удлинителей входной части профиля на потери в равнопрочных сопловых решетках.

1 Прочностные характеристики

Анализ результатов расчета напряжений в сопловых лопатках по методикам [4, 5] показывает, что в первом приближении независимо от удлинения \bar{L} решетки типа

© А.В. Лапузин, В.П. Субботович, Ю.А. Юдин, А.Ю. Юдин, В.Л. Швецов, И.И. Кожешкурт, В.А. Конев, 2014

Н4У равнопрочны, если их осевая ширина B одинакова (табл. 1).

В табл. 1: Z_c – число сопел, определенное по формуле $Z_c = \pi D_{cp} / (\bar{t}_x b_x)$ при $D_{cp} \approx 1000$ мм, $\bar{t}_x = t/b_x = 0,75$; W_u – момент сопротивления входной кромки профиля относительно оси, параллельной фронту выходных кромок, k_M – коэффициент, зависящий от числа сопловых лопаток и отношения наружных диаметров тела и обода диафрагмы.

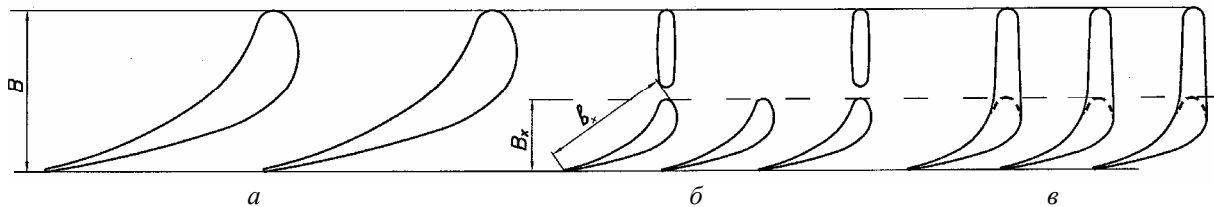


Рис. 1 – Варианты равнопрочных решеток:
а – Н4; б – Н4 + силовые стойки; в – Н4У

Таблица 1

Геометрические и прочностные характеристики решеток типа Н4У при $\bar{t}_x = 0,75$, $B = 125$ мм

Решетка	B_x , мм	B , мм	b_x , мм	\bar{L}	$\frac{b_x}{B}$	Z_c	W_u , см ³	$\frac{k_M}{W_u}$	$Z_c W_u$
Н4	125	125	227	0	1,818	19	77,0	0,052	1463
Н4У-69-125	69	125	125	0,45	1	34	55,3	0,052	1880
Н4У-55-125	55	125	100	0,70	0,8	42	43,3	0,053	1818
Н4У-44-125	44	125	80	1,00	0,64	53	32,8	0,060	1738
Н4У-35-125	35	125	64	1,40	0,51	66	23,6	0,071	1557

По методике [4] напряжение на входной кромке лопатки $\sigma = \frac{k_M \Delta P D^3}{W_u 1536}$

одинаково для диапазона $\bar{L} = 0-0,7$. Переход к решетке Н4У-35-125 с максимальным удлинением входной части повышает напряжение в 1,36 раза. Расчет напряжений по методике [5] $\sigma = 1,2 \Delta P D (D - d) l / (W_u Z_c)$ показывает, что при фиксированной осевой ширине решетки небольшое удлинение входной части профиля $\bar{L} = 0,45$ снижает напряжение на 29 %, а в решетке с максимальным удлинением $\bar{L} = 1,4$ напряжение даже на 6 % ниже, чем в решетке без удлинителя ($\bar{L} = 0$; $b_x = 227$ мм). В вышеприведенных формулах ΔP – перепад давления на диафрагме, D – наружный диаметр обода, d – внутренний диаметр тела диафрагмы.

2 Аэродинамическая эффективность решеток профилей типа Н4У

На рис. 2, который построен по данным [2], показано влияние относительного удлинения входной части профиля \bar{L} на интегральные потери решеток для разных отношений B/l , характеризующих относительную осевую ширину решеток. В работе [3] отмечается, что при сравнении равнопрочных диафрагм с лопатками профилей Н4 и лопатками с удлиненной входной частью (профиль Н4У) удобно пользоваться параметром B/l . При $B/l = \text{const}$ и $\bar{t}_x = \text{const}$ сравниваемые решетки, как отмечалось

выше, в первом приближении равнопрочны.

В подрисуночной подписи к рис. 2: $\bar{\delta}_x = \delta/b_x$ – относительная толщина выходной кромки, $\bar{t}_x = t/b_x$ – относительный шаг, $\bar{z} = z/b_x$ – относительное расстояние от фронта выходных кромок до сечения, где измеряются параметры потока, Re_{ltx} – число Рейнольдса, определенное по хорде исходного профиля b_x .

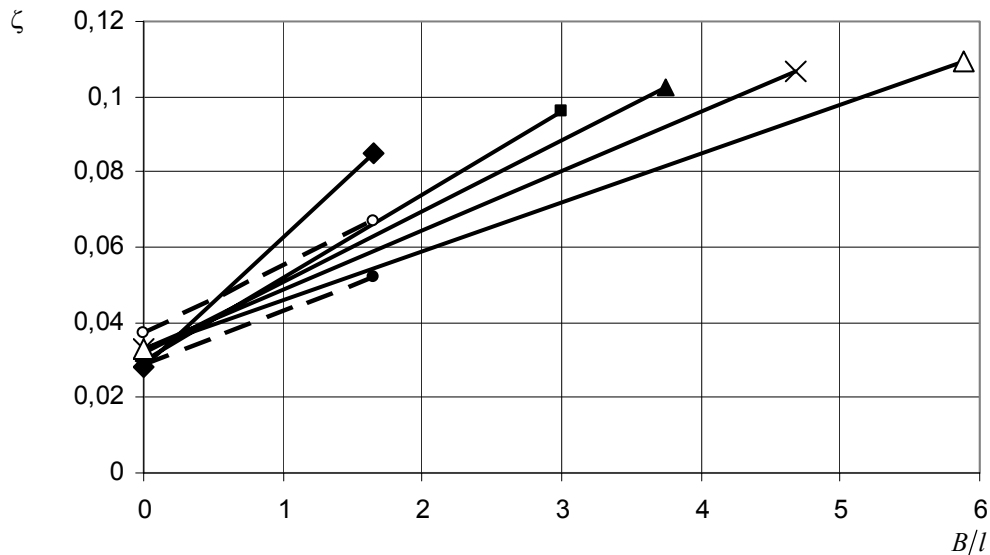


Рис. 2 – Влияние \bar{L} и B/l на интегральные потери в решетках типа Н4У при $M_{lt} = 0,35$, $Re_{ltx} = 9 \cdot 10^5$, $\alpha_0 = 90^\circ$, $\alpha_{13\phi} = 13,7^\circ$, $\bar{t}_x = 0,75$, $\bar{\delta}_x = 0,015$, $\bar{z}_x = 0,2$:
 ◆, ■, ▲, ×, Δ – Н4У при $\bar{L} = 0; 0,45; 0,7; 1; 1,4$;
 ○, ● – Н4УМ до и после коррекции числа Рейнольдса

В основе методики определения интегральных потерь ζ в решетках с удлиненной входной частью профиля лежит экспериментально подтвержденное положение о том, что профильные $\zeta_{пр}$ и концевые $\zeta_{к}$ потери в ней определяются в основном профильными $\zeta_{прx}$ и концевыми $\zeta_{кx}$ потерями в решетке исходных профилей, имеющих осевую ширину B_x (см. рис. 1б). При фиксированных размерах хорды исходного профиля b_x и шага решетки \bar{t}_x даже небольшое удлинение входной части, например, до значения $\bar{L} = 0,45$ снижает напряжения в лопатках в 4,4 раза. Профильные потери при этом увеличиваются в $k_7 = 1,08$ раза, а концевые в $k_9 = 1,16$ раза.

Приведенные на рис. 2 интегральные потери вычислялись по формуле $\zeta = \zeta_{пр} + \zeta_{к} = \zeta_{прx}k_7 + \zeta_{кx}k_9$, в которой коэффициент $\zeta_{прx} = 0,028$, коэффициент $\zeta_{кx} = 0,019b_x/l = 0,019(B/l)(b_x/B)$, а коэффициенты k_7 и k_9 являются функцией \bar{L} [2].

Линейная зависимость коэффициента концевых потерь $\zeta_{кx}$ от отношения b_x/l справедлива до значения $b_x/l \approx 3$, хотя уже при $b_x/l \approx 2$ зоны концевых потерь начинают смыкаться. Согласно стандарту [2] профиль Н4 может быть использован только для $B/l < 1,65$.

Во всех диафрагмах ЦВД турбины К-310-23,5-3 с целью унификации используется профиль Н4У-35-125 с максимальным удлинением $\bar{L} = 1,4$, а отношение B/l изменяется в диапазоне от 1,97 до 5,68. В этом диапазоне, как видно из рис. 2, потери сопловых решеток минимальны при $\bar{L} = 1,4$.

3 Решетка Н4УМ с модернизированной формой удлинителя профиля

При фиксированных геометрических параметрах решетки исходных профилей Н4 ($b_x, \bar{t}_x, \alpha_{1эф}, b_x/l$) удлинитель с простейшими прямолинейными очертаниями и толстой входной кромкой, как отмечалось выше, повышает как профильные так и концевые потери ($k_7 > 1, k_9 > 1$). Радиусное описание образующих удлинителя, более тонкая входная кромка [6] позволяют при $\bar{L} = 0,7$ снизить практически до единицы указанные коэффициенты. Как видно из рис. 2, у решетки Н4УМ при $B/l = 1,65$ интегральные потери ниже на $\sim 1\%$ по сравнению с решеткой Н4У.

Решетка профилей Н4УМ [6] выполнена с геометрическими параметрами $\alpha_{1эф} = 13,3^\circ, \bar{\delta}_x = 0,015, \bar{t}_x = 0,78, \bar{L} = 0,7$ и исследована при $M_{1t} = 0,375, Re_{1tx} = 3 \cdot 10^5, \bar{z}_x = 0,2$ в широком диапазоне углов атаки. Все перечисленные параметры кроме числа Рейнольдса практически совпадают с параметрами решеток типа Н4У на рис. 2, что и позволило корректно сравнить эффективность решеток Н4УМ и Н4У. Верхняя пунктирная линия на рис. 2 – результат испытаний Н4УМ при $Re_{1tx} = 3 \cdot 10^5$, нижняя – скорректированные данные для $Re_{1tx} = 9 \cdot 10^5$.

4 Решетка С-90-15АД с волнообразной формой удлинителя

В работах Московского энергетического института [7, 8] существенное снижение концевых потерь при фиксированных параметрах исходной решетки С-90-15А было достигнуто с помощью небольшого ($\bar{L} = 0,32$) удлинителя, имеющего волнообразную форму. Такая форма удлинителя сопловых лопаток в решетке С-90-15АД при $b_x/l = 1,23, M_{1t} = 0,5$ обеспечила снижение концевых потерь в 2 раза по результатам влажнопаровых испытаний [7] и в 1,3 раза по результатам испытаний на воздухе [8] (коэффициент $k_9 = 0,5$ и $0,77$ соответственно). Дельфинообразная форма сопловых лопаток привела к увеличению коэффициента профильных потерь примерно на $0,5\%$, однако по результатам испытаний на воздухе при $B/l = 2$ интегральные потери в решетке С-90-15АД не менее чем на 1% ниже, чем в исходной решетке С-90-15А.

5 Решетка ОРТ2У2 с волнообразной формой исходного профиля

Одно из направлений совершенствования решеток с короткими лопатками связано с поиском более экономичного исходного профиля (Н4, С-90-15А, Н1, Н5, Н6 и др.). В зависимости от уровня B/l этот исходный профиль может использоваться как без удлинителя (рис. 1а), так и с удлинителем той или иной формы и величины.

В НТУ «ХПИ» [9] на основе решения обратной задачи был спроектирован волнообразный профиль без удлинителя ОРТ2 для решетки $B/l = 1,9, \bar{t} = 0,645$. Как и дельфинообразный профиль С-90-15АД, он имеет выпуклость на «животике» и вогнутость на «спинке». По результатам испытаний концевые потери в решетке ОРТ2 вдвое ниже, чем в решетке Н4, а профильные выше. При $\bar{t} = 0,645$ решетка ОРТ2 экономичнее решетки Н4, если отношение $B/l > 0,6$, а при $B/l = 1,725$ интегральные потери в ней на 2% ниже.

Положительные результаты, полученные от удлинения входной части профиля

Н4 (рис. 2), модернізації форми удлинителя [6–8] и формы исходного профиля [9], были положены в основу создания решетки ОРТ2У2 с относительно небольшим удлинителем $\bar{L} = 0,54$.

Форма профиля и межлопаточного канала решетки ОРТ2У2, а также рассмотренных выше решеток Н4У, Н4УМ с $\bar{L} = 0,7$ и решетки МЭИ С-90-15АД с $\bar{L} = 0,32$ показана на рис. 3 (пунктиром отмечена ширина B_x исходного профиля).

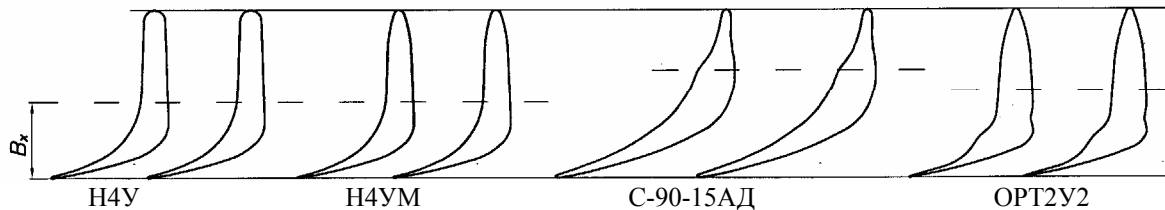


Рис. 3 – Варианты сопловых решеток с удлинителями профилей

В табл. 2 приведены геометрические характеристики этих решеток, а в табл. 3 данные о потерях и условиях эксперимента.

Таблица 2

Геометрические параметры решеток

Решетка	\bar{L}	B_x , мм	B , мм	b_x , мм	δ , мм	$\bar{\delta}_x$	\bar{t}_x	$\alpha_{1эф}$	l , мм
Н4У-55-125	0,7	55	125	100	1,5	0,0150	0,75	13,7°	33,3
Н4УМ	0,7	22,1	51,5	42	0,64	0,0150	0,78	13,3°	31
С-90-15АД	0,32	38,7	53,4	61,5	0,8	0,0130	0,75	15°	50
ОРТ2У2	0,54	34,66	66,09	58,2	0,32	0,0055	0,79	13,8°	40

Таблица 3

Потери в решетках

Решетка	\bar{z}_x	b_x/l	B/l	M_{1t}	Re_{1tx}	α_0	$\zeta_{пр}$	ζ_k	ζ
Н4У-55-125	0,2	3	3,75	0,35	$9 \cdot 10^5$	90°	0,0316	0,0707	0,1023
Н4УМ	0,2	1,36	1,65	0,375	$3,05 \cdot 10^5$	90°	0,0370	0,03	0,067
С-90-15АД	–	1,23	1,07	0,5	–	90°	0,0370	0,013	0,050
ОРТ2У2	0,19	1,455	1,65	0,4	$5,2 \cdot 10^5$	90°	0,0374	0,014	0,0514

Как видно из рис. 4а, построенного по фактическим экспериментальным данным (табл. 3), минимальные концевые и интегральные потери при $B/l > 0,5$ имеет вариант ОРТ2У2. Только в решетках с относительно длинными лопатками ($B/l < 0,5$) она уступает решетке Н4У-55-125, имеющей более низкие профильные потери. Если экспериментальные данные, приведенные в табл. 3, привести к одинаковым условиям ($Re_{1tx} = 9 \cdot 10^5$, $\bar{\delta}_x = 0,055$), то лучшим из всех рассмотренных вариантов при $B/l < 1,65$ будет вариант Н4УМ, имеющий низкие профильные потери. Лишь при $B/l = 1,65$ экономичность решетки ОРТ2У2 не уступает экономичности решетки Н4УМ. При $B/l = 1,65$ интегральные потери в решетках ОРТ2У2 и Н4УМ на $\sim 1\%$ ниже, чем в решетке Н4У с $\bar{L} = 0,7$ и на $\sim 3\%$ ниже, чем в решетке Н4. Минимальные концевые потери как при $b_x/l = \text{const}$ так и $B/l = \text{const}$ имеет вариант ОРТ2У2 (рис. 5).

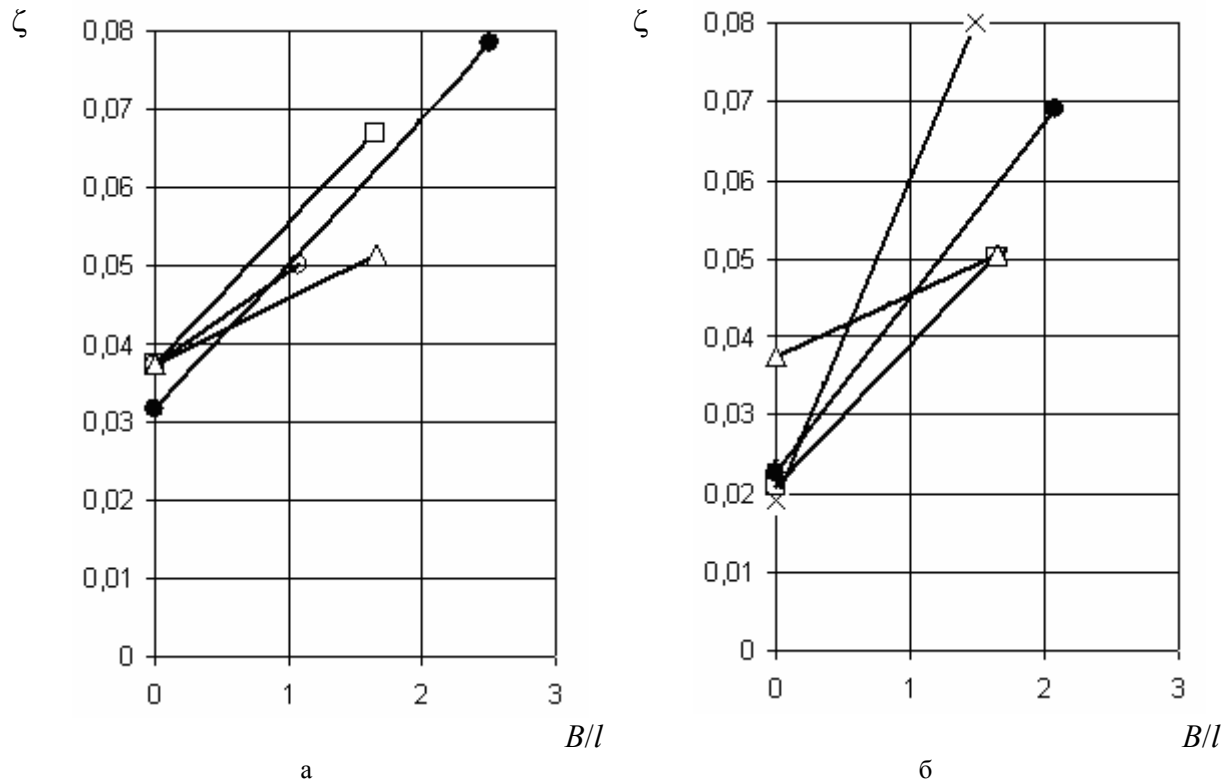


Рис. 4 – Фактические a и приведенные b интегральные потери в решетках:
 \times – Н4; \circ – С-90-15АД; \bullet – Н4У-55-125; \square – Н4УМ; Δ – ОРТ2У2

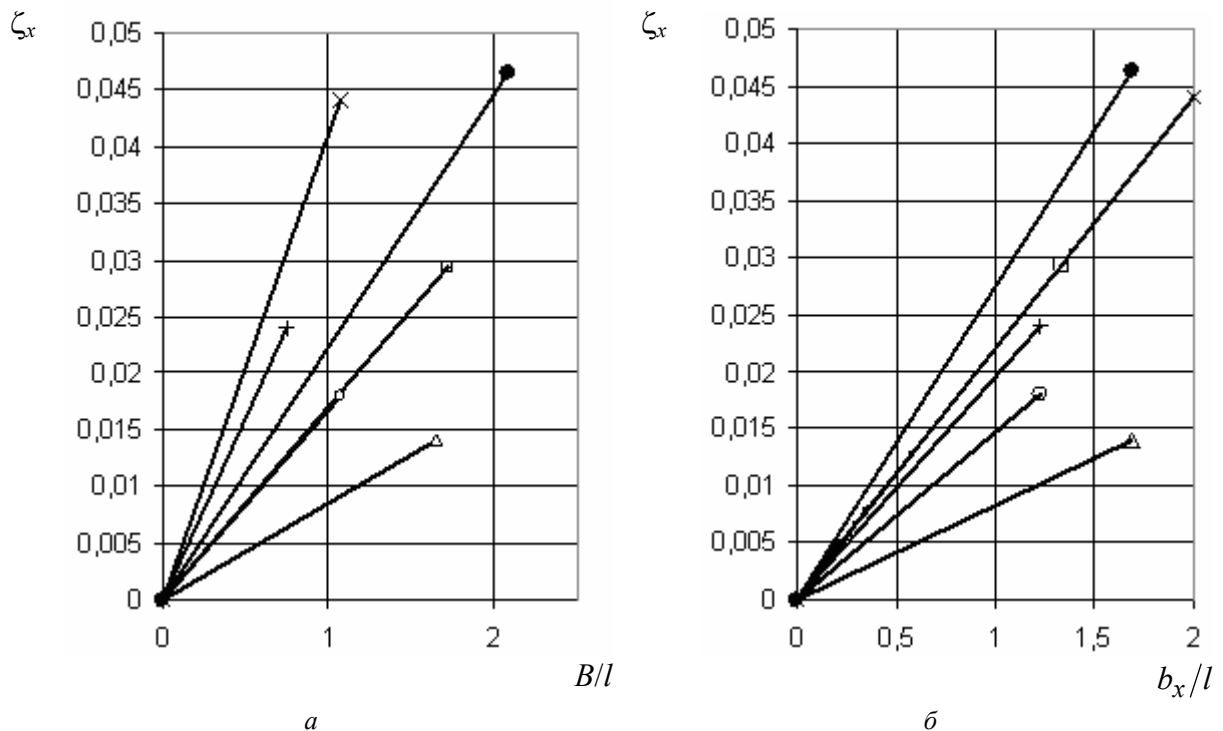


Рис. 5 – Приведенные ($Re_{1tx} = 5 \cdot 10^5$, $\bar{\delta}_x = 0,05$) концевые потери в сопловых решетках:
 \times – Н4; $+$ – С-90-15А; \circ – С-90-15АД; \bullet – Н4У-55-125; \square – Н4УМ; Δ – ОРТ2У2:
 $a - \zeta_x = f(B/l)$; $b - \zeta_x = f(b_x/l)$

6 Оптимальное удлинение входной части профиля \bar{L} решетки типа Н4У

Из рис 2. следует, что при фиксированных \bar{z}_x , $\bar{\delta}_x$ и $B/l > 0,5$ интегральные потери снижаются с ростом \bar{L} . Однако, если учесть, что при проектировании ступени заданными являются не только параметры B и l , но и абсолютные величины межвенцового зазора z и толщины выходной кромки δ , то окажется, что далеко не всегда максимальное удлинение $\bar{L} = 1,4$ является оптимальным, поскольку увеличение \bar{L} сопровождается уменьшением хорды исходного профиля, а следовательно увеличением \bar{z}_x , $\bar{\delta}_x$. Влияние последних параметров на потери можно ориентировочно учесть по следующим формулам:

$$\zeta_{\text{пр}} = 0,028k_7 + (\bar{\delta}_x - 0,015) + 0,04(\bar{z}_x - 0,2);$$

$$\zeta_{\text{к}} = (0,009 + 0,05\bar{z}_x) \left(\frac{B}{l} \right) \left(\frac{b_x}{B} \right) k_9 + 0,13(0,015 - \bar{\delta}_x) \left(\frac{B}{l} \right) \left(\frac{b_x}{B} \right);$$

$$\zeta = \zeta_{\text{пр}} + \zeta_{\text{к}}.$$

Коэффициенты k_7 и k_9 зависят только от \bar{L} , которое определяет также отношение b_x/B , влияющее на $\bar{\delta}_x = (\delta/B)/(b_x/B)$ и $\bar{z}_x = (z/B)/(b_x/B)$. Расчеты показывают, что для ступени с очень короткими лопатками ($B/l = 6$, $B = 80$ мм, $l = 13,3$ мм, $z = 8,5$ мм, $\delta = 0,6$ мм) минимальные потери имеет вариант с $\bar{L} = 1,4$, а для ступеней с более длинными лопатками ($B/l = 2,5$, $l = 32$ мм) вариант с $\bar{L} = 0,45$ (рис. 6), а при $B/l = 1$ – вариант без удлинителя.

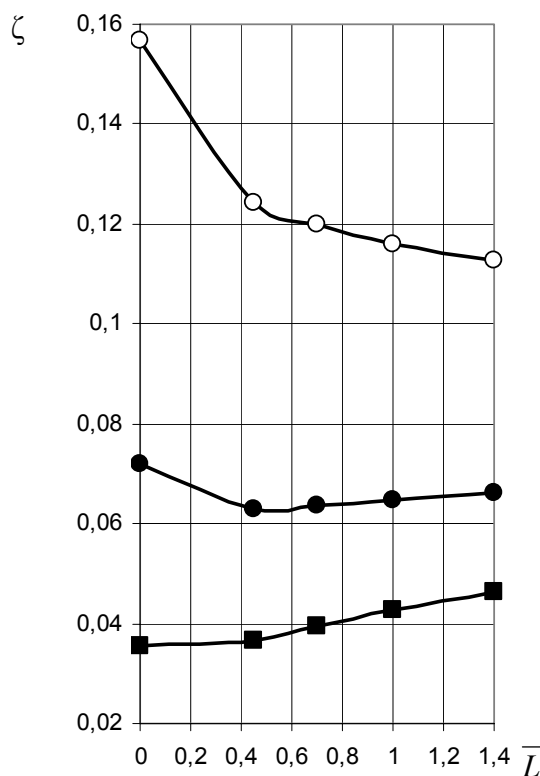


Рис. 6 – Влияние удлинения \bar{L} на суммарные потери ζ для решеток типа Н4У:
 ○ – $B/l = 6$; ● – $B/l = 2,5$; ■ – $B/l = 15$

ступеней с более длинными лопатками ($B/l = 2,5$, $l = 32$ мм) вариант с $\bar{L} = 0,45$ (рис. 6), а при $B/l = 1$ – вариант без удлинителя.

Выводы

1) Интегральные потери в решетках типа Н4У, отличающихся величиной удлинения \bar{L} , необходимо сравнивать при одинаковых значениях B/l , обеспечивающих условие равной прочности.

2) При фиксированных параметрах B/l , \bar{z}_x , $\bar{\delta}_x$ увеличение \bar{L} позволяет существенно снизить интегральные потери в решетках типа Н4У.

3) При фиксированных параметрах z , δ , \bar{t}_x каждому отношению B/l соответствует оптимальное значение \bar{L} решетки типа Н4У. При $B/l < 1$ оптимальной является решетка Н4 без удлинителя, если $\bar{z}_x < 0,2$, $\bar{t}_x = 0,75$.

4) Модернизация формы удлинителя (переход от Н4У к Н4УМ) позволяет снизить на ~0,2 % профильные потери и на ~0,8 % концевые потери при $B/l = 1,65$.

5) Решетки с волнообразными профилями (С-90-15АД, ОРТ2, ОРТ2У2) характеризующиеся высокими профильными и низкими концевыми потерями, могут

найти применение для ступеней с относительно короткими лопатками.

Список литературы: 1. Федоров, М. Ф. Экспериментальное исследование концевых потерь в конфузурных решетках и сопловых сегментах диафрагм паровой турбины [Текст] / М. Ф. Федоров, Ю. И. Погорелов, В. А. Кусенко // Харьковский политехнический институт. Сер. Машиностроение (турбиностроение). – 1957. – Том XXIV, Вып. 6. – С. 15–37. 2. Профили направляющих лопаток постоянного сечения паровых стационарных турбин. Типы основные параметры и размеры. ОСТ 108.260.01-84: утв. Министерством энергетического машиностроения 31.01.84; введен в действие с 01.07.84. – Л.: НПО ЦКТИ, 1985. – 62 с. 3. Галацан, В. Н. Исследование сопловых турбинных лопаток с увеличенным моментом сопротивления [Текст] / В. Н. Галацан, Д. Н. Пясик, В. А. Нестеренко [и др.] // Теплоэнергетика. – 1990. – № 5. – С. 39–42. 4. Жирицкий, Г. С. Конструкция и прочность деталей паровых турбин [Текст] / Г. С. Жирицкий, В. А. Струнkin. – М.: Машиностроение, 1968. – 520 с. 5. Шубенко-Шубин, Л. А. Прочность элементов паровых турбин [Текст] / Л. А. Шубенко-Шубин, Д. М. Гернер, Н. Я. Зельдес [и др.]. – М.; Л.: Машгиз, 1962. – 567 с. 6. Гречаниченко, Ю. В. Потери энергии в лопатках конечной длины при больших углах атаки [Текст] / Ю. В. Гречаниченко, В. А. Нестеренко, Д. И. Демичева [и др.] // Теплоэнергетика. – 1994. – № 4. – С. 12–15. 7. Дейч, М. Е. Экспериментальное исследование сопловой решетки с уменьшенными концевыми потерями [Текст] / М. Е. Дейч, Ш. В. Делер, Б. А. Коршунов // Теплоэнергетика. – 1994. – № 10. – С. 39–42. 8. Коршунов, Б. А. Влияние относительной высоты лопаток на потери в турбинных сопловых решетках [Текст] / Б. А. Коршунов, А. А. Тищенко, А. П. Щербаков [и др.] // Теплоэнергетика. – 2005. – № 6. – С. 19–22. 9. Юдин, А. Ю. Прямая, гибридная и обратная задачи для оптимального проектирования элементов проточной части турбомашин: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.16; защищена 18.05.2006; утв. 04.07.2006 / Юдин Александр Юрьевич. – Х., 2005. – 135 с.

Bibliography (transliterated): 1. Fedorov, M. F., Ju. I. Pogorelov and V. A. Kusenko. "Jeksperimental'noe issledovanie koncevyh poter' v konfuzornyh reshetkah i soplovyh segmentah diafragm parovoj turbiny." *Har'kovskij politehnicheskij institut. Ser. Mashinostroenie (turbinostroenie)*. Vol. XXIV.6. 1957. 15–37. Print. 2. OST 108.260.01-84. *Profili napravljajushhijh lopatok postojannogo sechenija parovyh stacionarnyh turbin. Tipy osnovnye parametry i razmery*. Leningrad: NPO CKTI, 1985. Print. 3. Galacan, V. N., et al. "Issledovanie soplovyh turbinnih lopatok s uvelichenym momentom soprotivlenija." *Teplojenergetika* 5 (1990) 39–42. Print. 4. Zhirickij, G. S., and V. A. Strunkin. *Konstrukcija i prochnost' detalej parovyh turbin*. Moscow: Mashinostroenie, 1968. Print. 5. Shubenko-Shubin, L. A., et al. *Prochnost' jelementov parovyh turbin*. Moscow: Mashgiz, 1962. Print. 6. Grechanichenko, Ju. V., et al. "Poteri jenergii v lopatkah konečnoj dlinny pri bol'shijh uglah ataki." *Teplojenergetika* 4 (1994): 12–15. Print. 7. Dejch, M. E., Sh. V. Deler and B. A. Korshunov. "Jeksperimental'noe issledovanie soplovoj reshetki s umen'shennymi koncevyimi poterjami." *Teplojenergetika* 10 (1994): 39–42. Print. 8. Korshunov, B. A., et al. "Vlijanie odnositel'noj vysoty lopatok na poteri v turbinnih soplovyh reshetkah." *Teplojenergetika* 6 (2005): 19–22. Print. 9. Judin, A. Ju. *Prjamaja, gibridnaja i obratnaja zadachi dlja optimal'nogo proektirovanija jelementov protočnoj chasti turbomashin: dis. ... kand. tehn. nauk*. Kharkov, 2005. Print.

Поступила (received) 15.02.2014