

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Научная статья

УДК 621.165

DOI: <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2023-66-20>

**Расчет потерь кинетической энергии в сверхзвуковых рабочих решетках
при моделировании переменных режимов малорасходных турбин**

Рафаиль Равильевич Симашов¹, Сергей Валентинович Чехранов², Илья Николаевич Ханькович³

^{1, 2, 3} Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия

¹ forsimashov@yandex.ru

² turboroom@yandex.ru

³ ilbech-han@mail.ru

Аннотация. Степень достоверности решения задачи многорежимной оптимизации малорасходных турбин во многом определяется от совпадения истинных и принятых в расчете потерь кинетической энергии в рабочем колесе. Анализ методик расчета потерь энергии в сверхзвуковых рабочих решетках различных авторов показал, что представленные в этих работах зависимости позволяют использовать их лишь на расчетном режиме и не учитывают влияние толщины входных кромок на потери в рабочем колесе. Приводятся обобщающие зависимости коэффициентов потерь кинетической энергии в сверхзвуковых рабочих решетках малорасходных турбин, в широком диапазоне изменения определяющих геометрических и режимных параметров, учитывается влияние периодической нестационарности потока. Представленные в работе эмпирические зависимости составляют математическую модель определения коэффициента потерь кинетической энергии в сверхзвуковых рабочих решетках. Данная модель может быть использована при моделировании переменных режимов и многорежимной оптимизации малорасходных турбин.

Ключевые слова: малорасходные турбины, переменные режимы, коэффициенты потерь кинетической энергии, сверхзвуковые рабочие решетки

Для цитирования: Симашов Р.Р., Чехранов С.В., Ханькович И.Н. Расчет потерь кинетической энергии в сверхзвуковых рабочих решетках при моделировании переменных режимов малорасходных турбин // Научные труды Дальрыбвтуза. 2023. Т. 66, № 4. С. 162–172.

MARINE POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2023-66-20>

Calculation of kinetic energy losses in supersonic working grids when modeling variable modes of low-flow turbines

Rafail R. Simashov¹, Sergei V. Chekhranov², Ilya N. Khankovich³

^{1, 2, 3} Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia

¹ forsimashov@yandex.ru

² turboroom@yandex.ru

³ ilbech-han@mail.ru

Abstract. The degree of reliability of solving the problem of multimode optimization of low-consumption turbines is largely determined by the coincidence of the true and assumed kinetic energy losses in the impeller. The analysis of methods for calculating energy losses in supersonic working grids by various authors has shown that the dependencies presented in these works allow them to be used only in the design mode and do not take into account the influence of the thickness of the input edges on the losses in the impeller. The paper presents generalizing dependences of kinetic energy loss coefficients in supersonic working grids of low-flow turbines, in a wide range of changes in the determining geometric and operating parameters, the influence of periodic unsteadiness of the flow is taken into account. The empirical dependences presented in the paper constitute a mathematical model for determining the coefficient of kinetic energy loss in supersonic working grids. This model can be used in modeling variable modes and multi-mode optimization of low-flow turbines.

Keywords: low-consumption turbines, variable modes, kinetic energy loss coefficients, supersonic working grids

For citation: Simashov R.R., Chekhranov S.V., Hankovich I.N. Calculation of kinetic energy losses in Supersonic working grids in modeling variable modes of low-flow turbines. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2023; 66(4):162–172. (in Russ.).

Введение

Степень достоверности решения задачи многорежимной оптимизации малорасходных турбин (МРТ) во многом определяется от совпадения истинных и принятых в расчете потерь кинетической энергии в рабочем колесе (РК). Это особенно важно для сверхзвуковых МРТ, так как уровень потерь в РК определяет режимы с пропуском через решетку РК максимально возможного, для данных условий, расхода рабочего тела. Имеющиеся на сегодня многочисленные обобщения и методики расчета коэффициентов потерь кинетической энергии в рабочих решетках профилей, позволяющие использовать их в задачах оптимального проектирования, относятся к дозвуковым или трансзвуковым решеткам профилей [3]. Для сверхзвуковых решеток МРТ число таких работ ограничено [1, 2].

Обобщения опытных данных по коэффициентам потерь кинетической энергии в сверхзвуковых рабочих решетках

Анализ методик расчета потерь энергии в сверхзвуковых рабочих решетках из работ [1, 2] показал, что представленные в этих работах зависимости отражают влияние основных влияющих параметров: t/b , ω , $\sin\beta_{1к}/\sin\beta_{2к}$, a_m/a_1 , a_2/a_1 , $\Delta_{кр2}$, b_2/l_2 ; числа M_{2l} и дают хорошее согласие расчета с опытом на расчетном режиме. Приведенные в этих работах выражения, учитывающие влияние числа M_{2l} на профильные потери, а также выражения для концевых потерь, позволяют использовать их лишь в узком диапазоне изменения данного параметра $M_{2l} = 1.4 \dots 1.85$. Указанные методики не учитывают влияние толщины входных кромок на потери в РК, указывая

на тот факт, что современные сверхзвуковые решетки имеют тонкие входные кромки. Однако обеспечить малые значения отношения $\Delta_{кр2}/a_1 = 0 \dots 0,02$, полученные в опытах на плоских моделях, в МРТ, как правило, не представляется возможным осуществить по технологическим и прочностным соображениям. По этим причинам рабочие колеса МРТ характеризуются повышенными значениями параметра $\Delta_{кр2}/a_1 \leq 0,3$, а представленные в работах [5, 4] опытные данные свидетельствуют о значительном влиянии толщины входной кромки на потери энергии в сверхзвуковой рабочей решетке и на эффективность МРТ.

Таким образом, представляется целесообразным создание математической модели для расчета потерь кинетической энергии в РК сверхзвуковых МРТ в широком диапазоне режимов по числу M_{2i} путем синтеза уже имеющихся зависимостей для отдельных составляющих потерь энергии и вновь полученных, которая бы отражала совместное влияние периодической нестационарности, турбулентности и неравномерности.

Эмпирические зависимости коэффициентов потерь кинетической энергии сверхзвуковых рабочих решеток

Профильные потери на расчетном режиме обычно представляют в виде суммы потерь трения, кромочных и волновых:

$$\zeta_{np}^p = \zeta_{тр} + \zeta_{кр} + \zeta_{волн}. \quad (1)$$

Такое представление ζ_{np}^p , несмотря на некоторую условность, позволяет, как это было показано в [2], для $\zeta_{тр}$ воспользоваться результатами обобщений по дозвуковым решеткам, а различие степени влияния на потери отдельных параметров для до- и сверхзвуковых решеток учесть $\zeta_{волн}$. В этой же работе приводятся зависимости для $\zeta_{тр}$ и $\zeta_{волн}$ в виде уравнений регрессии, в зависимости от основных влияющих параметров (для потерь трения: $\Theta = \beta_{1к} + \beta_{2к}$, $K = \sin\beta_{1к}/\sin\beta_{2к}$, $\bar{t}_p = t_p/B_p$, $\bar{C}_{max} = C_{max}/B_p$; для волновых потерь: $a_m, a_1, a_2, R_{сн}, R_k$; рис. 1).

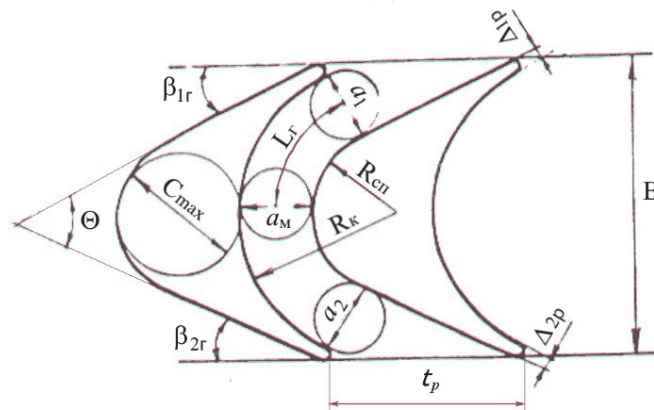


Рис. 1. Схема сверхзвуковой активной решетки
Fig. 1. Supersonic active grid circuit

$$\begin{aligned} \zeta_{тр} = & a_1\Theta^2 + a_2\Theta K + a_3\Theta\bar{C}_{max} + a_4\Theta\bar{t}_p + a_5K^2 + a_6K\bar{C}_{max} + a_7K\bar{t}_p + \\ & + a_8\bar{C}_{max}^2 + a_9\bar{t}_p\bar{C}_{max} + a_{10}\bar{t}_p^2 + a_{11}\Theta + a_{12}K + a_{13}\bar{C}_{max} + a_{14}\bar{t}_p + a_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $a_i, i = \overline{0, 14}$ – коэффициенты регрессии (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты регрессии (2)

Table 1

Regression coefficients (2)

a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
0.03775	-0.02194	-0.08823	0.0573	0.0096
a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀
-0.0171	-0.0308	0.234	-0.418	0.283
a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₀
-0.102	0.0085	0.3253	-0.4573	0.276

Зависимость (2) получена из более общей зависимости из работы [6] для профильных потерь в дозвуковых решетках путем исключения из последней слагаемых, определяющих кромочные потери и потери на нерасчетных режимах.

Волновые потери, возникающие в сверхзвуковой активной решетке, формально можно разделить на три группы [4]: потери в скачках уплотнения, обусловленные толщиной и формой входной кромки, потери, вызванные отрывом и в скачках уплотнения, которые зависят от формы межлопаточного канала (МЛК), и потери в выходной системе ударных волн и местных отрывов. Такое разделение, хотя и условно, однако представляется целесообразным, так как позволяет использовать имеющиеся опытные данные по кромочным потерям [4], а волновые потери, связанные с формой МЛК, учесть как разницу [2]:

$$\zeta_{\text{волн}} = \zeta_{\text{пр}}^P - \zeta_{\text{кр}} \quad (3)$$

в зависимости от параметров, определяющих форму МЛК.

Волновые потери $\zeta_{\text{волн}}$ в работе [2] представлены следующим уравнением регрессии:

$$\zeta_{\text{волн}} = 0.3492 - 0.6411K_1 + 0.0267K_2 + 0.2871K_1^2 - 2.1504K_2^2 + 10.0136K_2^3, \quad (4)$$

где $K_1 = (a_m^2 / a_1 / a_2)(q_{\text{ср}}^{\text{max}} / q_{2t})^2$, $K_2 = (a_1 - a_m) / L_2$, L_2 – протяженность канала на участке от входного до минимального сечения,

$$q_{\text{ср}}^{\text{max}} = 0.595 + 1.3765(R_k / R_{\text{сн}}) - 1.6144(R_k / R_{\text{сн}})^2 + 0.6429(R_k / R_{\text{сн}})^3.$$

Выражение (4) получено в результате обработки опытных данных [8, 7] по профильным потерям в сверхзвуковых решетках по формулам (3) и (2). Определяющее влияние указанных параметров на внутриканальные волновые потери подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями [7, 8, 1].

Для определения кромочных потерь, обусловленных конечной толщиной выходных кромок, используем выражение, являющееся результатом обобщения экспериментальных данных из работы [9] которое подтверждается исследованиями [10]:

$$\zeta_{\text{кр}2} = \frac{0.57}{\sqrt{1 + M_{2t}^P}} \cdot \frac{\Delta_{\text{кр}2}}{a_2}, \quad (5)$$

где $\Delta_{\text{кр}2}$ – толщина выходной кромки лопатки РК (см. рис. 1).

Для учета влияния на профильные потери толщины входных кромок воспользуемся опытными данными работ [5, 4], которые в диапазоне чисел $M_{w2t} = 1.25 \dots 1.83$ удовлетворительно аппроксимируются простым выражением

$$\zeta_{кр1} = 0.32\sqrt{\Delta_{кр1}/a_2}, \quad (6)$$

где $\Delta_{кр1}$ – толщина входной кромки лопатки РК (см. рис. 1).

Приведенные зависимости могут быть использованы в диапазоне изменения $M_{w2t} = 1.0 \dots 1.83$ и $\Delta_{кр}/a = 0 \dots 0.35$.

На рис. 2 представлены опытные данные из работ [12, 11] по изменению профильных потерь в сверхзвуковых активных решетках с постоянным сечением канала ($a_m/a_1 = a_2/a_1 = 1.0$) при отклонении режима их работы от расчетного по числу M_{w2t} .

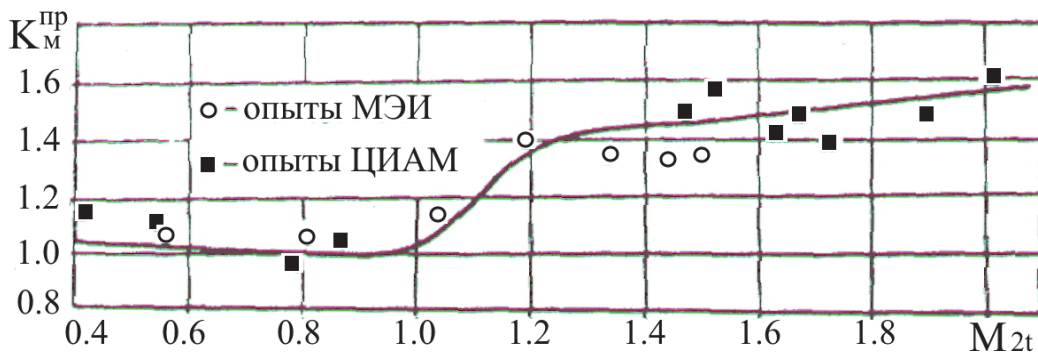


Рис. 2. Влияние числа M_{w2} на выходе из решетки на коэффициент профильных потерь в сверхзвуковой рабочей решетке с постоянным сечением канала ($a_m/a_1 = a_2/a_1 = 1.0$)

Fig. 2. The effect of the M_{w2} number at the outlet of the grating on the coefficient of profile losses in a supersonic working grating with a constant channel cross section ($a_m/a_1 = a_2/a_1 = 1.0$)

В статье [7] приводится опытная зависимость допустимой степени сужения МЛК a_m/a_1 , гарантирующей отсутствие запираания, в зависимости от M_{w2t} , которая подтверждается результатами работы [8]. Из которой следует, что в диапазоне $M_{w2t}^p = 1.0 \dots 1.5$ рекомендуется МЛК выполнять постоянного сечения, а при $M_{w2t}^p = 1.6 \dots 2.5$ МЛК должен быть суживающе-расширяющимся и a_m/a_1 меняется от 1.0 до 0.75, причем в диапазоне $M_{w2t}^p = 1.5 \dots 1.85$ – $a_m/a_1 = 1.0 \dots 0.93$. Для определения потерь энергии на переменных по числу M_{w2t} режимах для сверхзвуковых решеток с $a_m/a_1 < 1.0$ можно воспользоваться характеристиками, представленными в работах [7, 12], или обобщающей зависимостью из [2], однако применение их в задачах многорежимной оптимизации МРТ представляется проблематичным ввиду узкого промежутка варьирования по числу M_{w2t} .

Таким образом, в окончательном виде профильные потери в сверхзвуковой активной решетке на расчетном и переменном, по числу M_{w2t} , режимах могут быть определены из соотношения

$$\zeta_{пр} = \zeta_{пр}^p \cdot K_m^{np} = (\zeta_{трен} + \zeta_{кр1} + \zeta_{кр2} + \zeta_{волн})_p \cdot K_m^{np}, \quad (7)$$

где коэффициент K_m^{np} в соответствии с рис. 2 вычисляется из выражения

$$K_m^{np} = \begin{cases} \sum_{i=0}^5 a_i M_{w2t}^i, & \text{если } 0.4 \leq M_{w2t} \leq 1.1; \\ \sum_{i=0}^5 b_i M_{w2t}^i, & \text{если } 1.1 \leq M_{w2t} \leq 2.0. \end{cases} \quad (8)$$

Значения коэффициентов регрессии (8) b_i, a_i приведены табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнения регрессии (8)

Table 2

Values of coefficients of the regression equation (8)

i	0	1	2
a_i	-2.028386	25.003526	-78.930780
b_i	-93.824352	296.072406	-366.179157
i	3	4	5
a_i	120.964884	-90.557980	26.570512
b_i	225.074545	-68.706847	8.333407

Потери энергии, связанные с конечной длиной лопатки, главным образом, потери на парный вихрь, будем учитывать коэффициентом концевых потерь $\zeta_{\text{конц}}$. Который в случае сверхзвуковых активных решеток зависит от числа M_{w2t} и в области изменения отношений $a_m/a_1 = 0.8 \dots 1.076$, $a_1/a_2 = 0.975 \dots 0.986$, $a_m/a_2 = 0.77 \dots 1.061$ (профили симметричные $\beta_y = 90^\circ$) может быть определен по следующему довольно известному выражению [13]:

$$\zeta_{\text{конц}} = \frac{0.13}{1 + M_{w2t}} \frac{b_2}{l_2}, \quad (9)$$

которое является удовлетворительным результатом обобщения экспериментальных данных в диапазоне числа $M_{w2t} = 0.7 \dots 1.5$. Однако структура формулы (9) позволяет экстраполировать значения $\zeta_{\text{конц}}$ вплоть до $M_{w2t} \leq 2.0$, что подтверждается данными работы [14].

В итоге суммарные потери в сверхзвуковых активных решетках, при расчетном угле натекания и равномерном потоке на входе в решетку определяются в виде суммы:

$$\zeta_{\Sigma} = \zeta_{np} + \zeta_{\text{конц}}. \quad (10)$$

На рис. 3 представлены результаты сопоставления экспериментальных данных, приведенных в работах [12, 11, 7], с расчетом по приведенным зависимостям (7) – (10). Как можно видеть, расхождение расчетных и экспериментальных значений суммарных и профильных потерь не превышает 2 % и можно считать удовлетворительным.

Для повышения надежности решения задачи многорежимной оптимизации МРТ необходимо учитывать потери энергии в РК, вызванные неравномерностью потока на входе в рабочие межлопаточные каналы – потери от нестационарности.

Для успешного решения задачи многорежимной оптимизации МРТ важно иметь простые аналитические зависимости коэффициента потерь энергии от небольшого числа конструктивных и режимных параметров, которые уже известны на этапе решения данной задачи. В работах [15, 16] приводятся простые аналитические зависимости для определения потерь энергии от нестационарности в сверхзвуковых МРТ. Однако использование формул из работ [15, 16] непосредственно для определения дополнительных потерь от нестационарности в РК

не представляется возможным, так как определяемые по этим формулам потери авторы относят к внутренним потерям в МРТ.

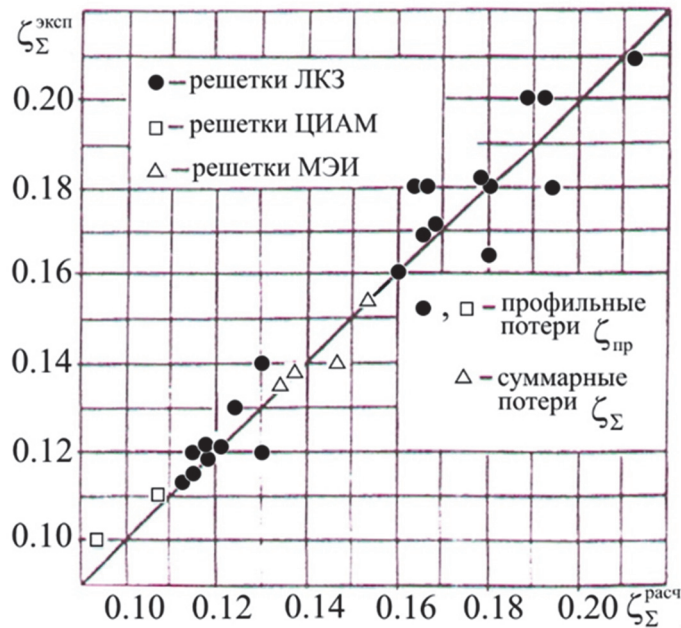


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений коэффициентов потерь кинетической энергии

Fig. 3. Comparison of experimental and calculated values of kinetic energy loss coefficients

Однако существует достаточное количество работ, посвященных исследованию периодической нестационарности на дозвуковых решетках профилей и содержащих в себе простые формулы, позволяющие определить дополнительные потери от нестационарности в зависимости от некоторых геометрических и режимных параметров. Результаты исследования [1], проведенные на сверхзвуковых рабочих решетках с большим относительным шагом и модельных ступенях, показали, что потери от нестационарности в сверхзвуковых решетках зависят от тех же факторов, что и в дозвуковых.

Поэтому правомочным будет подход, когда дополнительные потери от нестационарности определяются зависимостью, удовлетворительно аппроксимирующей экспериментальные данные различных авторов, учитывающей влияние наибольшего количества основных влияющих факторов и обеспечивающей наилучшее совпадение рассчитанных по математической модели и опытных данных по КПД сверхзвуковых МРТ различных авторов в широком диапазоне изменения геометрических и режимных параметров.

Анализ работ, посвященных исследованию влияния нестационарности на потери в дозвуковых решетках, показал, что в наибольшей степени сформулированным требованиям удовлетворяет зависимость, предложенная в работе [17]:

$$\left(\zeta_{np}^H - \zeta_{np}\right) / \zeta_{np} = 0.5 \cdot (t_p / t_c) \cdot (U / C_1) \cdot (\beta_{1k} + \beta_{2k}) \cdot \varpi_{w1} \quad (11)$$

где $\varpi_{w1} = \left(\frac{1 - (U/C_1) \cdot \cos \alpha_1}{(U/C_1)^2 - 2 \cdot (U/C_1) \cdot \cos \alpha_1 + 1} \right) \cdot \varpi_{c1}$ – неравномерность потока в относительном движении; ϖ_{c1} – неравномерность потока в абсолютном движении на выходе из СА, по данным [18].

Результаты сопоставления экспериментальных данных различных авторов с зависимостью (11) представлены на рис. 4, как видно, совпадение хорошее. Однако прямое использование формулы (11) в математической модели МРТ затруднительно, так как нереально предположить, что дополнительные потери от нестационарности $\zeta_n = \zeta_n^H - \zeta_{np}$ пропорциональны стационарным. Потери могут быть тем больше, чем выше аэродинамическое совершенство решетки в однородном потоке (из-за турбулизации пограничного слоя, который в стационарных условиях в решетке может быть ламинарным).

Анализ экспериментальных данных работ [17, 19], использованных для получения зависимости (11), показал, что величина профильных потерь энергии ζ_{np} в стационарном потоке различных решеток профилей лежит в пределах 0.03 ... 0.04. Поэтому зависимость для дополнительных потерь от нестационарности окончательно представим в следующем виде:

$$\zeta_n = 0.0175 \cdot (t_p/t_c) \cdot (U/C_1) \cdot (\beta_{1к} + \beta_{2к}) \cdot \varpi_{w1}, \quad (12)$$

где $\beta_{1к}, \beta_{2к}$ – в градусах, а ϖ_{w1} – определяется по приведенным выше формулам.

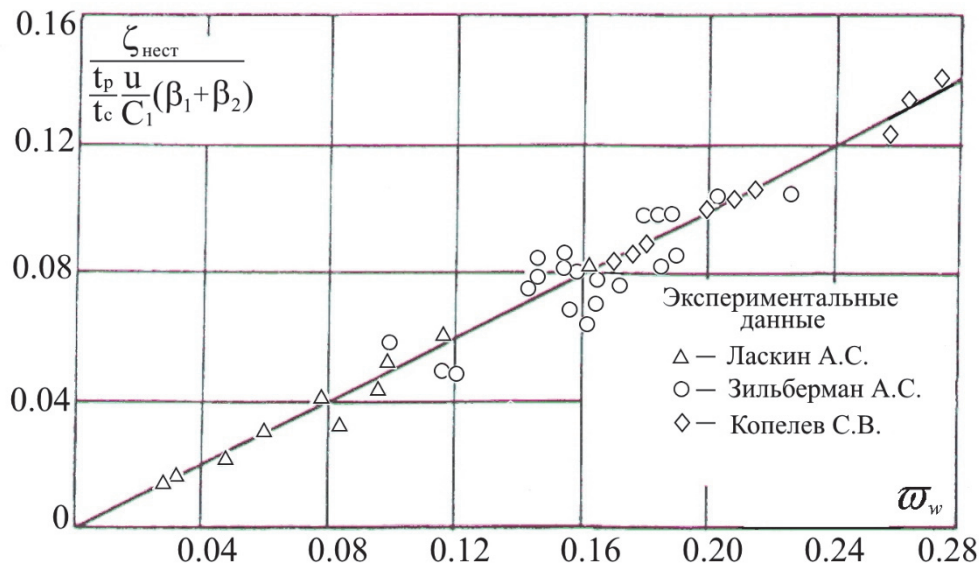


Рис. 4. Потери от нестационарности потока в рабочих решетках и сопоставление с опытными данными

Fig. 4. Losses from unsteady flow in working grids and comparison with experimental data

Заклучение

Приведенные обобщенные зависимости коэффициентов отдельных составляющих потерь кинетической энергии рабочих решеток сверхзвуковых МРТ отражают влияние определяющих геометрических $\Theta = \beta_{1к} + \beta_{2к}, K = \sin\beta_{1к}/\sin\beta_{2к}, \overline{t_p}, \overline{C_{max}}, a_m/a_1, a_1/a_2, a_m/a_2, \frac{b_2}{l_2}, \Delta_{kp}/a$

и режимных M_{w2}, ϖ_{w1} параметров. Данные зависимости могут быть использованы при моделировании переменных режимов и решении задач многорежимной оптимизации МРТ в следующих пределах их изменения: $\beta_{1к} = 20 \dots 36^\circ, a_m/a_1 = 0.8 \dots 1.1, a_1/a_2 = 0.975 \dots 1.0, a_m/a_2 = 0.77 \dots 1.0, \Delta_{kp}/a = 0 \dots 0.35, M_{w2l} = 0.5 \dots 2.0$ с близкими к оптимальным относительными шагами $\overline{t_p}$.

Список источников

1. Куприянов О.Е. Определение газодинамических оптимальных параметров сверхзвуковых турбинных решеток с большим поворотом потока: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1988. 298 с.
2. Погодин Ю.М., Косарев А.В., Петров А.С. Расчет потерь в сверхзвуковых активных турбинных решетках // Тр. ЛКИ: Проблемы повышения эффективности судовых энергетических установок. Л.: Изд-во ЛКИ, 1985. С. 82–89.
3. Левенталь М.Ю., Погодин Ю.М., Миронов Ю.Р. Совершенствование методики расчетного определения потерь энергии в турбинных решетках профилей // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 3, № 2. С. 104–109.
4. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974. 592 с.
5. Дейч М.Е., Дахнович А.А. Влияние толщины кромок рабочих лопаток на экономичность сверхзвуковой турбинной ступени // Теплоэнергетика. 1971. № 10. С. 80–81.
6. Венедиктов В.Д., Колесов А.Н. Обобщение результатов продувок плоских дозвуковых решеток газовых турбин методами регрессионного анализа // Тр. ЦИАМ. 1978. № 814. С. 1–24.
7. Исследование облопатывания сверхзвуковых двухвенечных ступеней / Б.В. Альфер, З.Г. Бочарова, В.Д. Пшеничный, А.И. Слепухин // Проблемы проектирования современных паровых турбин: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Л.: Судостроение, 1972. С. 45–59.
8. Слепухин А.И. Исследование сверхзвукового облопатывания судовых турбин заднего хода: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1970. 174 с.
9. Кириллов И.И., Павлов А.П. Кромочные потери энергии в турбинных решетках активного типа при больших скоростях потока // Энергомашиностроение. 1969. № 1. С. 47–48.
10. Туапетел, Дж. В. Влияние толщины и формы выходной кромки на потери кинетической энергии в сопловых турбинных решетках / Дж. В. Туапетел, В.А. Рассохин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 2. С. 72–76.
11. Атлас экспериментальных характеристик плоских турбинных решеток / Г.Ю. Степанов, В.А. Эпштейн, В.В. Гольцев и др. М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 1964.
12. Губарев А.В. Исследование рабочих решеток турбин при сверхзвуковых скоростях // Изв. вузов. Авиационная техника. 1962. № 2. С. 102–112.
13. Павлов А.П. Влияние высоты лопаток и формы каналов на концевые потери в сверхзвуковых рабочих решетках турбин // Тр. ЛПИ. 1968. № 297. С. 22–25.
14. Туапетел Дж. В. Влияние вторичных течений газа в межлопаточных каналах на потери кинетической энергии в турбинной ступени // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 3. С. 27–31.
15. Раков Г.Л. Аэродинамическое совершенствование малорасходных турбин: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1982. 137 с.
16. Юсупов Э.И. Исследование некоторых методов повышения КПД одновенечных сверхзвуковых парциальных турбин: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛКИ, 1970. 168 с.
17. Копелев С.З., Зикеев В.В. Аэродинамические потери в лопаточных решетках рабочих колес турбин при нестационарном обтекании // Теплоэнергетика. 1979. № 8. С. 40–44.
18. Степанов Г.Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М.: Физматгиз, 1962. 512 с.
19. Зильберман А.С. и др. Дополнительные потери энергии из-за периодической нестационарности потока в рабочих лопатках турбинных ступеней // Теплоэнергетика. 1973. № 10. С. 55–58.
20. Бусурин В.Н. Турбинные многорежимные автономные энергетические установки малой мощности: автореф. дис. ... доктора наук по энергетическому, металлургическому и химическому машиностроению, 05.04.12. СПб., 1995.

References

1. Kuprijanov O.E. *Opređenje gazodinamičeskikh optimal'nykh parametrov sverhzhukovykh turbinnykh reshetok s bol'shim povorotom potoka: dis. ... kand. tehn. nauk.* L.: LPI, 1988. 298 s.
2. Pogodin Ju.M., Kosarev A.V., Petrov A.S. *Raschet poter' v sverhzhukovykh aktivnykh turbinnykh reshetkah // Trudy LKI: Problemy povyšeniya jeffektivnosti sudovykh jenergetičeskikh ustanovok.* L.: Izd-vo LKI, 1985. S. 82–89.
3. Levental' M.Ju., Pogodin Ju.M., Mironov Ju.R. *Sovershenstvovanie metodiki raschetnogo opredelenija poter' jenerгии v turbinnykh reshetkah profilej. Morskie intellektual'nye tehnologii.* 2021. T. 3, № 2. С. 104–109.
4. Dejch M.E. *Tehnicheskaja gazodinamika.* M.: Jenerгija, 1974. 592 s.
5. Dejch M.E., Dahnovich A.A. *Vlijanie tolshhiny kromok rabochih lopatok na jekonomičnost' sverhzhukovoj turbinnoj stupeni // Teplojenergetika.* 1971, № 10. S. 80–81.
6. Venediktov V.D., Kolesov A.N. *Obobshhenie rezul'tatov produvok ploskih dozvukovykh reshetok gazovykh turbin metodami regressionnogo analiza // Trudy CIAM.* 1978, № 814. S. 1–24.
7. *Issledovanie oblopatyvanija sverhzhukovykh dvuhvenechnykh stupenej / B.V. Al'fer, Z.G. Bocharova, V.D. Pshenichnyj, A.I. Slepuhin // Problemy proektirovanija sovremennykh parovykh turbin: tez. dokl. Vsesojuznoj nauch.-tehn. konf. L.: Sudostroenie, 1972. S. 45–59.*
8. Slepuhin A.I. *Issledovanie sverhzhukovogo oblopatyvanija sudovykh turbin zadnego hoda: dis. ... kand. tehn. nauk.* L.: LPI, 1970. 174 s.
9. Kirillov I.I., Pavlov A.P. *Kromochnye poteri jenerгии v turbinnykh reshetkah aktivnogo tipa pri bol'shikh skorostjah potoka // Jenergomashinoostroenie.* 1969. № 1. S. 47–48.
10. Tuapetel, Dzh. V. *Vlijanie tolshhiny i formy vyhodnoj kromki na poteri kinetičeskoj jenerгии v soplovykh turbinnykh reshetkah / Dzh. V. Tuapetel, V.A. Rassohin // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU.* 2009. № 2. S. 72–76.
11. *Atlas jeksperimental'nykh harakteristik ploskih turbinnykh reshetok / G.Ju. Stepanov, V.A. Jepshtejn, V.V. Gol'cev i dr. Moskva: CIAM im. P.I. Baranova, 1964.*
12. Gubarev A.V. *Issledovanie rabochih reshetok turbin pri sverhzhukovykh skorostjah // Izv. VUZov. Aviacionnaja tehnika.* 1962. № 2. S. 102–112.
13. Pavlov A.P. *Vlijanie vysoty lopatok i formy kanalov na koncevye poteri v sverhzhukovykh rabochih reshetkah turbin // Trudy LPI.* 1968. № 297. S. 22–25.
14. Tuapetel, Dzh. V. *Vlijanie vtoričnykh tečenij gaza v mezhlopatočnykh kanalakh na poteri kinetičeskoj jenerгии v turbinnoj stupeni // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU.* 2010. № 3. S. 27–31.
15. Rakov G.L. *Ajerodinamičeskoe sovershenstvovanie malorashodnykh turbin: dis. ... kand. tehn. nauk.* L.: LPI, 1982. 137 s.
16. Jusupov Je.I. *Issledovanie nekotorykh metodov povyšeniya KPD odnovenechnykh sverhzhukovykh parcial'nykh turbin: dis. ... kand. tehn. nauk.* L.: LKI, 1970. 168 s.
17. Kopelev S.Z., Zikeev V.V. *Ajerodinamičeskie poteri v lopatočnykh reshetkah rabochih koles turbin pri nestacionarnom obtekanii // Teplojenergetika.* 1979. № 8. S. 40–44.
18. Stepanov G.Ju. *Gidrodinamika reshetok turbomashin.* M.: Fizmatgiz, 1962. 512 s.
19. Zil'berman A.S. i dr. *Dopolnitel'nye poteri jenerгии iz-za periodičeskoj nestacionarnosti potoka v rabochih lopatkah turbinnykh stupenej // Teplojenergetika.* 1973. № 10. S. 55–58.
20. Busurin V. N. *Turbine multimode autonomous low-power power plants: abstract dis. ... PhD in Energy, Metallurgical and Chemical Engineering, 05.04.12. St. Petersburg, 1995.*

Информация об авторах

Р.Р. Симашов – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Судовые энергетические установки», SPIN-код: 7339-4915, AuthorID: 693480;

С.В. Чехранов – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Судовые энергетические установки», SPIN-код: 9145-4473, AuthorID: 473792;

И.Н. Ханькович – старший преподаватель кафедры «Судовые энергетические установки», SPIN-код: 6371-0465, AuthorID: 695086.

Information about the authors

R.R. Simashov – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ship Power Plants, SPIN-cod: 7339-4915, AuthorID: 693480;

S.V. Chekhranov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Ship Power Plants, SPIN-код: 9145-4473, AuthorID: 473792;

I.N. Khankovich – Senior Lecturer of the Department of Ship Power Plants, SPIN-код: 6371-0465, AuthorID: 695086.

Статья поступила в редакцию 01.12.2023; одобрена после рецензирования 04.12.2023; принята к публикации 05.12.2023.

The article was submitted 01.12.2023; approved after reviewing 04.12.2023; accepted for publication 05.12.2023.