

**О. В. ЛАПУЗИН, В. П. СУБОТОВИЧ, Ю. О. ЮДИН, С. П. НАУМЕНКО**

**ВПЛИВ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАТКОВИХ РЕШІТОК  
ТА КРИТЕРІЇВ РЕЖИМУ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТАРНОГО СТУПЕНЯ ТУРБИНИ  
НА ЙОГО ЕФЕКТИВНІСТЬ**

Розглянуто вплив режимних критеріїв  $u_2/C_\phi$  і  $\lambda_\phi$  на ступінь реактивності, відносний лопатковий та гідравлічний коефіцієнти корисної дії (ККД) ступенів активного і реактивного типів. Доведено, що при зменшенні у декілька разів потужності багатоступінчастої турбіни з сопловим паророзподілом різке падіння відносного лопаткового ККД регулюючого ступеня значною мірою залежить не лише від зменшення критерія  $u_2/C_\phi$ , але і різкого підвищення критерія  $\lambda_\phi$ . Вплив критерія  $\lambda_\phi$  на гідравлічний ККД ступенів реактивного типу знаходиться в межах 2 % і може бути як негативним так і позитивним в залежності від співвідношення між коефіцієнтами швидкості решіток. Детальний аналіз причин, що впливають на відносний лопатковий ККД останнього ступеня парової турбіни в умовах зміни об'ємної витрати пари, неможливий без аналізу змін, які відбуваються в роботі кожної елементарної струминки течії, тобто від характеру зміни її форми, аеродинамічних характеристик решіток і локальних режимних параметрів  $\lambda_\phi$  і  $u_2/C_\phi$ . Для групи турбінних ступенів знайдено комплекс з трьох параметрів, вплив якого на гідравлічний ККД та ступінь реактивності ідентичний впливу режимного критерія  $\lambda_\phi$ . Використання іншого комплексу дозволяє об'єднати результати розрахунку впливу на гідравлічний ККД та ступінь реактивності параметрів нециліндричності течії та кута виходу потоку з соплової решітки.

**Ключові слова:** одновимірний потік, газодинамічні характеристики решіток, режимні критерії ступеня, ККД.

**O. LAPUZIN, V. SUBOTOVICH, Yu. YUDIN, S. NAUMENKO  
THE INFLUENCE OF GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS OF BLADE CASCADES  
AND MODE CRITERIA OF AN ELEMENTARY TURBINE STAGE ON THE ITS EFFICIENCY**

Consideration is given to the effect of the mode criteria  $u_2/C_\phi$  and  $\lambda_\phi$  on the degree of reactivity and relative blade and hydraulic efficiency coefficients (REC) of the active and reactive types of stages. It has been proved that with a decrease in power of a multi-stage turbine with nozzle steam distribution by several times, an abrupt drop in the relative blade efficiency of the regulating stage largely depends not only on the decrease in the  $u_2/C_\phi$  criterion, but also on the various increase in the  $\lambda_\phi$  criterion. The effect of the  $\lambda_\phi$  criterion on the hydraulic efficiency of the stages of the reactive type is within 2 % and it can be both negative and positive depending on the ratio between the cascade speed coefficients. A detailed analysis of the reasons affecting the relative blade efficiency of the last stage of a steam turbine under conditions of a change in the volumetric steam flow rate is impossible without analyzing the changes that occur in the operation of each elementary flow jet, i.e., the nature of a change in its shape, the aerodynamic characteristics of the cascades, and the local operating parameters  $\lambda_\phi$  and  $u_2/C_\phi$ . For a group of turbine stages, a set of three parameters was revealed, the effect of which on the hydraulic efficiency and the degree of reactivity is identical to the effect of the operating criterion  $\lambda_\phi$ . Using another set, we managed to combine the calculated results of the effect on hydraulic efficiency and the degree of reactivity of the parameters of non-cylindricity of the flow and the angle of flow exit from the nozzle cascade.

**Key words:** one-dimensional flow, gas-dynamic characteristics of cascades, operating criteria of the stage, and the efficiency.

**Вступ**

В [1] доведено, що ступінь реактивності і економічність елементарного турбінного ступеня залежить від одинадцяти параметрів, чотири з яких – параметри нециліндричності течії – можуть на декілька відсотків зменшити гідравлічні втрати в соплових і робочих решітках, а радіальна складова швидкості потоку за робочим колесом підвищити ще на 6 % – 8 % втрати з вихідною швидкістю. Таким чином у найнесприятливіших умовах негативний вплив від нециліндричності течії на відносний лопатковий коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\eta_{вл}$  може досягти 10 % і визначається рівнем радіальної складової швидкості в контрольних перетинах ступеня і формою його меридіональних окреслень.

Вплив на ефективність роботи ступеня сімох інших параметрів: критеріїв подібності  $u_2/C_\phi$ ,  $\lambda_\phi$ , кутів потоку  $\alpha_1$ ,  $\beta_2$ , коефіцієнтів швидкості решіток  $\phi$ ,  $\psi$  і коефіцієнта адиабати  $k$  розглянуто в

книгах і підручниках з теорії турбомашин [2] – [5] недостатньо докладно, що пов'язане у більшості випадків з використанням в розрахункових залежностях ступеня реактивності  $\rho$ , яка не є незалежним параметром. При використанні для групи активних ступенів формули  $\eta_{вл} = f(\phi, \psi, u_2/C_\phi, \alpha_1, \beta_1, \beta_2)$  угорського професора Доната Банкі треба мати на увазі, що разом з режимним параметром  $u_2/C_\phi$  автоматично змінюється відношення торцевих площ елементарного турбінного ступеня в перетинах перед і за робочим колесом (параметр нециліндричності течії  $\bar{F}$ ) або режимний параметр  $\lambda_\phi$ , або одночасно  $u_2/C_\phi$ ,  $\bar{F}$ ,  $\lambda_\phi$ . Тому згадана формула непридатна для аналізу роботи активного ступеня на змінних режимах, коли збільшення режимних параметрів  $u_2/C_\phi$  і  $\lambda_\phi$  підвищує ступінь реактивності  $\rho$ .

Ті самі проблеми притаманні і формулі  $\eta_{вл} = f(\phi, \psi, u_2/C_\phi, \alpha_1, \beta_2, \rho)$  для ступенів з різним рівнем ступеня реактивності. В ній відсутні параметри  $\bar{F}$  і  $\lambda_\phi$ , але це не заважає зробити важливий



© О. В. Лапузін, В. П. Суботович, Ю. О. Юдін, С. П. Науменко, 2026  
Дослідницька стаття. Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією  
Creative Commons Attribution (CC BY 4.0)

висновок про те, що зростання ступіня реактивності збільшує як оптимальне відношення швидкостей  $u_2/C_\phi$ , так і максимальне значення ККД  $\eta_{вл}$  за умови, коли підвищення  $\rho$  відбувається за рахунок зменшення кута потоку  $\beta_2$  при постійних значеннях коефіцієнтів швидкості і кута потоку  $\alpha_1$ .

Відомо [6] – [11], що підвищення режимного критерія  $\lambda_\phi$  може суттєво вплинути на ККД ступеня внаслідок підвищення чисел Маха і Рейнольдса решіток, зміни кута атаки робочого колеса, коефіцієнтів швидкості  $\phi$ ,  $\psi$  і ступеня реактивності. При зменшенні потужності багатоступінчастої парової турбіни в її останніх ступенях одночасне зростання  $u_2/C_\phi$  і зменшення  $\lambda_\phi$  супроводжується також зміною параметрів нециліндричності течії  $\bar{F}$ ,  $\bar{u}$ ,  $\gamma_1$ ,  $\sigma_2$  в окремих струминках потоку. Тому питання про вплив кожного з перелічених вище параметрів на економічність і ступінь реактивності турбінного ступеня є актуальним. Для їх розв'язання зручно скористатися алгоритмом теплового розрахунку елементарного турбінного ступеня [1]. Так як в багатоступінчастих турбінах кінетична енергія потоку за більшістю ступенів майже повністю використовується в наступних ступенях, основну увагу треба приділяти питанню впливу параметрів  $\lambda_\phi$ ,  $u_2/C_\phi$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ ,  $\alpha_1$  на гідравлічний ККД  $\eta'$  і ступінь реактивності  $\rho$ .

### Мета роботи

1 Визначити вплив режимних параметрів  $\lambda_\phi$ ,  $u_2/C_\phi$  і кута потоку  $\beta_2$  на ступінь реактивності і економічність ступенів активного і реактивного типів при незмінних значеннях коефіцієнтів швидкості решіток  $\phi$ ,  $\psi$ .

2 Визначити вплив відношення  $\bar{F}$  і співвідношення між кутами потоку  $\alpha_1$  і  $\beta_2$  на ступінь реактивності та економічність турбінного ступеня.

3 Визначити вплив співвідношення між коефіцієнтами швидкості  $\phi$  і  $\psi$  на величину гідравлічного ККД ступенів з різним рівнем ступеня реактивності.

### Методика термогазодинамічного розрахунку ступеня

Методика термогазодинамічного розрахунку елементарного ступеня теплової турбіни представлена в [1]. Вихідними даними є:

- $\alpha_1, \beta_2$  – кути потоку в перетинах 1 і 2 (рис. 1);
- $\gamma_1$  – кут між вектором абсолютної швидкості потоку за сопловою решіткою  $\bar{C}_1$  і його проекцією на циліндричну поверхню;

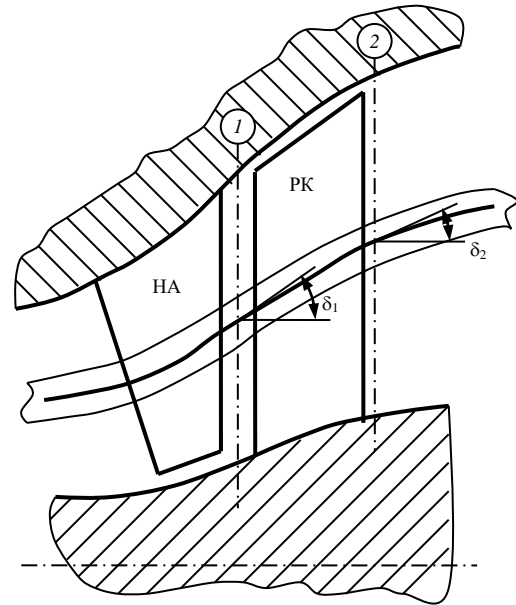


Рис. 1 – Турбінний ступінь і елементарна струминка току

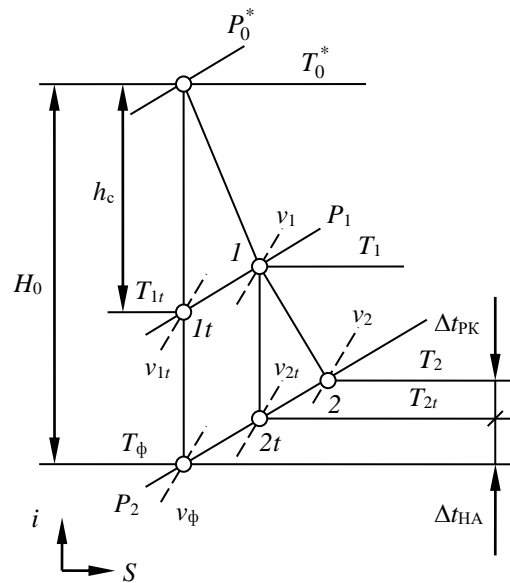


Рис. 2 – Термодинамічний процес в турбінному ступені

$\sigma_2$  – кут між вектором відносної швидкості потоку за робочою решіткою  $\bar{W}_2$  і його проекцією на циліндричну поверхню;

$\phi$  і  $\psi$  – коефіцієнти швидкості соплової і робочої решіток;

$F_1/F_2 = \bar{F}$  – відношення торцевих площ струминки течії в перетинах 1 і 2;

$\bar{u} = u_1/u_2$  – відношення колових швидкостей;

$k$  – коефіцієнт ізоентропи;

$\lambda_\phi$  – питома швидкість, яка відповідає відношенню тисків в  $P_2/P_0^*$  і  $k$  (рис. 2),

$$\lambda_\phi = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

$u_2/C_\phi$  – відношення колової швидкості в перетині 2 до фіктивної швидкості потоку.

Перелічені параметри визначають питому швидкість потоку за сопловою решіткою  $\lambda_{C_{1r}}$ , яка методом ітерацій знаходиться з рівняння

$$1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_{C_{1r}}^2 = \frac{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_\phi^2}{\left[ \frac{\bar{F} \sin \alpha_1 \cos \gamma_1 \mu_1 v_{2t}}{\sin \beta_2 \cos \sigma_2 \mu_2 v_\phi} \frac{\lambda_{C_{1r}}}{\sqrt{\lambda_\phi^2 - \lambda_{C_{1r}}^2 (1 - \varphi^2) + \left( \frac{u_2}{C_\phi} \right)^2 \lambda_\phi^2 - 2 \frac{u_2}{C_\phi} \bar{u} \lambda_\phi \lambda_{C_{1r}} \varphi \cos \gamma_1 \cos \alpha_1}} \right]^{k-1}} \quad (1)$$

Після знаходження  $\lambda_{C_{1r}}$  підраховується:

– ступінь реактивності:

$$\rho = 1 - \frac{\lambda_{1r}^2}{\lambda_\phi^2}, \quad (2)$$

– гідравлічний ККД

$$\eta' = 1 - (1 - \varphi^2)(1 - \rho) - (1 - \psi^2) \left[ 1 - (1 - \rho)(1 - \varphi^2) + \left( \frac{u_2}{C_\phi} \right)^2 - 2 \frac{u_2}{C_\phi} \bar{u} \sqrt{1 - \rho} \varphi \cos \gamma_1 \cos \alpha_1 \right]; \quad (3)$$

– відносний лопатковий ККД

$$\eta_{вл} = 2 \frac{u_2}{C_\phi} \left[ \sqrt{1 - \rho} \bar{u} \cos \alpha_1 \cos \gamma_1 - \frac{u_2}{C_\phi} + \psi \cos \beta_2 \cos \sigma_2 \sqrt{1 - (1 - \rho)(1 - \varphi^2) + \left( \frac{u_2}{C_\phi} \right)^2 - 2 \frac{u_2}{C_\phi} \bar{u} \varphi \cos \alpha_1 \cos \gamma_1 \sqrt{1 - \rho}} \right]. \quad (4)$$

В статті [1] розглянуто вплив параметрів нециліндричності течії  $\gamma_1, \sigma_2, \bar{u}, \bar{F}$  на роботу групи ступенів при зафіксованих величинах  $\alpha_1 = 25^\circ, \beta_2 = 30^\circ, k = 1,4, \varphi = 0,95, \psi = 0,9, u_2/C_\phi = 0,525, \lambda_\phi = 0,508$ . При такому  $\lambda_\phi$  стисливість газу майже не виявляється, тому комплекс втрат  $\mu_1 v_{2t} / (\mu_2 v_\phi)$  в формулі (1) можна було прийняти рівним відношенню  $\varphi/\psi$ .

Оскільки ступінь реактивності майже не залежить від коефіцієнта ізоентропи, інтерес становлять питання впливу режимних критеріїв  $u_2/C_\phi, \lambda_\phi$  і кутів потоку  $\alpha_1, \beta_2$  та коефіцієнтів швидкості  $\varphi, \psi$  на ступінь реактивності і економічність елементарного турбінного ступеня.

#### Аналіз роботи ступенів активного і реактивного типів на змінних режимах

Як відомо, активні ( $\rho < 0,2$ ) і реактивні ( $\rho > 0,2$ ) ступені відрізняються лише формою міжлопаткових каналів робочої решітки і співвідношеннями між кутами потоку  $\alpha_1$  і  $\beta_2$  та між коефіцієнтами  $\varphi$  і  $\psi$  (відомо, що при збіль-

шенні  $\rho$  з 0 до 0,5 коефіцієнт швидкості  $\psi$  росте сильніше ніж  $\varphi$ ). В умовах зафіксованого кута  $\alpha_1 = 13^\circ$ , оптимального для ступенів високого тиску парових турбін, розглянемо роботу на різних режимах класичного активного ступеня ( $\rho = 0$ ) з кутом  $\beta_2 = 30^\circ$  і класичного реактивного ступеня ( $\rho = 0,5$ ) з кутом  $\beta_2 = 13,25^\circ$  при однакових величинах параметрів  $\varphi, \psi, \bar{F}, \gamma_1, \sigma_2, \bar{u}$ , вказаних на рис. 3–6.

В умовах незначного впливу стисливості газу ( $\lambda_\phi = 0,508$ ) зменшення кута  $\beta_2$  з  $30^\circ$  до  $13,25^\circ$  призводить до підвищення оптимального відношення швидкостей з 0,46 до 0,65 (рис. 3), ступеня реактивності  $\rho$  з 0 до 0,5 (рис. 4), а відносного лопаткового ККД  $\eta_{вл}$  на 3,5 %. Гідравлічний ККД  $\eta'$  при цьому зменшується на 2,5 %.

Суцільні лінії на рис. 4 та 5 збудовані за алгоритмом, в якому використовується формули (1)–(3), що дозволило визначити вплив режимного критерія  $u_2/C_\phi$  на ступінь реактивності ступенів активного і реактивного типів. Якщо уявити собі, що при зміні  $u_2/C_\phi$  ступінь реактивності активного ступеня збереться на нульовому рівні, то формула (1) вже непотрібна, оскільки по формулі (3)

можна побудувати залежність відносного лопаткового ККД групи ступенів з  $\rho = 0$  від параметра  $u_2/C_\phi$  (пунктирна лінія на рис. 3). Пунктирна лінія на рис. 4 вказує на те, що лише при  $u_2/C_\phi = 0,525$  відношення площ  $\bar{F} \approx 0,96$ .

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\left[1 - 0,1666(1-\rho)\lambda_\phi^2\right]^{3,5} \left\{1 - 0,1666 \left[\lambda_\phi^2 \psi^2 + (1-\rho)\lambda_\phi^2 (\varphi^2 - \psi^2)\right]\right\}}{\left[1 - 0,1666\lambda_\phi^2\right]^{3,5} \left[1 - 0,1666(1-\rho)\lambda_\phi^2 \varphi^2\right]}, \quad (5)$$

а потім комплекс

$$\frac{\bar{F}}{\sin \beta_2 \cos \sigma_2} = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{u_2}{C_\phi}\right)^2} - (1-\varphi_2) - \frac{2\varphi m \frac{u_2}{C_\phi}}{\sqrt{1-\rho}}}{\frac{v_2}{v_1} \sin \alpha_1 \cos \gamma_1 \frac{\varphi}{\psi}}, \quad (6)$$

в якому

$$m = \bar{u} \cos \alpha_1 \cos \gamma_1. \quad (7)$$

Для групи активних ступенів на рис. 3 та 4 відношення  $v_2/v_1 = 1$ , а

$$\bar{F} = 2,106 \sqrt{0,9025 + \left(\frac{u_2}{C_\phi}\right)^2} - 1,851 \frac{u_2}{C_\phi}.$$

На рис. 5 та 6 показано спільний вплив режимних параметрів  $u_2/C_\phi$  і  $\lambda_\phi$  на роботу ступенів активного і реактивного типів. Для ступеня активного типу (рис. 5) збільшення  $\lambda_\phi$  з 0,508 до 1,2 підвищує оптимальне відношення швидкостей з 0,46 до приблизно 0,525 і майже не змінює  $\eta_{вл}$ ,  $\eta'$ ,  $\rho$  на режимах, коли відношення  $u_2/C_\phi$  більше оптимального значення. При зменшенні потужності парової турбіни з сопловим паророзподілом на 20 % – 30 % по відношенню до номінальної в її активному регулюючому ступені (РС) підвищується ККД  $\eta_{вл}$  внаслідок наближення відношення швидкостей  $u_2/C_\phi$  до свого оптимального значення. Подальше зменшення потужності і відношення  $u_2/C_\phi$  та різке зростання  $\lambda_\phi$  призводить до різкого зменшення ККД  $\eta_{вл}$  і ступеня реактивності  $\rho$  (рис. 5). В реальних умовах інтенсивність падіння ступеня реактивності РС набагато менше внаслідок збільшення кута атаки робочої решітки і зміни коефіцієнта швидкості  $\psi$ .

В прикореневих струминках течії останніх ступенів (ОС) парових і газових турбін убування об'ємної витрати робочого тіла змінює не тільки  $\lambda_\phi$ ,  $u_2/C_\phi$ ,  $\psi$ , але і форму струминок в меридіональній площині, тобто параметри  $\bar{F}$  і  $\bar{u}$ . Визначальними параметрами впливу на ККД  $\eta_{вл}$  є  $\psi$ ,  $\bar{F}$ ,  $\sigma_2$ . Для РС і ОС визначальним ККД є відносний лопатковий ККД  $\eta_{вл}$ , оскільки кінетична енергія потоку за цими ступенями повністю втрачається.

Розглянемо роботу в умовах змінних режимів ступеня з високим рівнем ступеня реактивності, яка майже не залежить від режимного критерія

Розрахунок параметра  $\bar{F}$  зроблено в такий спосіб. Спочатку знаходиться відношення питомих об'ємів

$u_2/C_\phi$ , але різко підвищується при зростанні критерія  $\lambda_\phi$  (рис. 6). Збільшення  $\lambda_\phi$  у два рази незначно підвищує оптимальне для ККД  $\eta_{вл}$  відношення швидкостей  $u_2/C_\phi$ , но зменшує максимум цього ККД майже на 3 %, що потрібно брати до уваги при аналізі економічних показників ОС парових і газових турбін. В лабораторії турбінобудування НТУ «ХПІ» в так званих «холодних» умовах була досліджена робота турбіни високого тиску мало-розмірної авіаційної газотурбінної установки [12]. Одночасна зміна  $\lambda_\phi$  з 0,4 до 1,0 і  $u_2/C_\phi$  з 0,6 до 0,18 призвела до зниження  $\eta_{вл}$  з 0,71 до 0,4 і підвищення  $\rho$  з 0,15 до 0,27.

Для більшості ступенів багатоступінчастих турбін визначальним є гідравлічний ККД  $\eta'$ , який може зменшитися на 2,5 % у разі переходу від  $\lambda_\phi = 0,508$  до  $\lambda_\phi = 1,2$ . У багатьох випадках ступені реактивного типу або окремі струминки течії турбінних ступенів функціонують при значно більших значеннях режимного критерія  $\lambda_\phi$ .

#### Вплив відношення $\bar{F}$ та співвідношення між кутами $\alpha_1$ і $\beta_2$ на ступінь реактивності і ККД

З формул (1), (2) витікає, що в умовноциліндричних ступенях з  $\bar{u} = 1$ ,  $\gamma_1 = 0$ ,  $\sigma_2 = 0$  питома швидкість  $\lambda_{1r}$  та ступінь реактивності  $\rho$  визначаються головним чином величиною комплексу  $\bar{F} \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_2}$ . При  $\alpha_1 = 13^\circ$ ,  $\varphi = 0,95$ ,  $\psi = 0,9$ ,  $\bar{F} = 0,95$ ,

$k = 1,4$ ,  $\gamma_1 = 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\bar{u} = 1$ ,  $\lambda_\phi = 0,508$ ,  $u_2/C_\phi = 0,525$  зменшення кута  $\beta_2$  з  $30^\circ$  до  $13,25^\circ$  підвищує  $\rho$  з 0 до 0,5 (рис. 4), ККД  $\eta_{вл}$  на 2 % і знижує ККД  $\eta'$  на 1,4 % (рис. 3). Поетапний процес переходу від класичного активного ступеня до класичного реактивного ступеня показаний на рис. 7. Якщо ККД  $\eta'$  монотонно убуває зі зростанням  $\rho$ , то залежність  $\eta_{вл} = f(\rho)$  має екстремум при

$\rho = 0,3$ ,  $\beta_2 = 18,1^\circ$ . Для побудови лінії  $\eta' = f(\rho)$  задіяна тільки формула (3), а кути  $\beta_2$  над лінією  $\eta_{вл} = f(\rho)$  для групи ступенів з  $\bar{F} = 0,95$  підраховані по формулам (5) – (7).

Якби підвищення ступіня реактивності з 0 до 0,5 відбувалося не за рахунок зменшення кута  $\beta_2$ , а за рахунок збільшення відношення площ  $\bar{F}$  з 0,95 до 2,07, то це б привело до падіння ККД  $\eta_{вл}$  на 5,4 %. Аналіз формул (3), (4) показує, що при постійних значеннях  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\alpha_1$ ,  $\gamma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\bar{u}$ ,  $u_2/C_\phi$  підвищення кута  $\beta_2$  ніяк не впливає на ККД  $\eta'$ , але зменшує ККД  $\eta_{вл}$  внаслідок зростання втрат з вихідною швидкістю  $\xi_{в.ш.} = \eta' - \eta_{вл}$ .

В ступенях газових турбін рівень кутів  $\alpha_1$  і  $\beta_2$  набагато вищий ніж у парових турбінах. З рис. 7 видно, що у разі підвищення кута  $\alpha_1$  з  $13^\circ$  до  $25^\circ$  гідравлічний ККД зменшується на 1 %, а відносний лопатковий ККД на 1 % – 2 % в залежності від рівня  $\rho$ . Дві нижні лінії на рис. 7 побудовані за допомогою формули (4).

#### Вплив співвідношення між коефіцієнтами швидкості $\varphi$ і $\psi$ на характер залежності гідравлічного ККД від ступіня реактивності

Як правило, газодинамічна ефективність соплових решіток вище ніж робочих, тому на рис. 3 – 7 проілюстровано роботу ступенів з  $\varphi = 0,95 > 0,9 = \psi$ . В орієнтовному тепловому розрахунку парових і газових турбін АТ «Українські енергетичні машини» (АТ «Турбоатом») використовує  $\varphi = 0,97 > 0,93 = \psi$ . При такому співвідношенні збільшення ступіня реактивності зменшує гідравлічний ККД  $\eta'$  внаслідок підвищення відношення перепаду ентальпії  $\frac{W_{2t}^2}{2}$  до  $\frac{C_{1t}^2}{2}$ , тобто відношення

$$\frac{W_{2t}^2}{C_{1t}^2} = \frac{1 + \left(\frac{u_2}{C_\phi}\right)^2}{1 - \rho} - (1 - \varphi^2) - \frac{2 \frac{u_2}{C_\phi} \varphi m}{\sqrt{1 - \rho}}. \quad (8)$$

Якщо  $\varphi = 0,95 > 0,9 = \psi$ ,  $u_2/C_\phi = 0,525$ ,  $\alpha_1 = 25^\circ$ ,  $m = 0,9063$ , збільшення  $\rho$  з 0 до 0,5 підвищує відношення перепадів ентальпії з 0,27 до 1,18 і зменшує ККД  $\eta'$  на згадані вище 1,4 % (рис. 8). З рис. 8 видно, що при  $\varphi = \psi$  підвищення  $\rho$  (за рахунок, наприклад, зміни кута  $\beta_2$  або режимного критерія  $\lambda_\phi$ ) вже позитивно впливає на гідравлічний ККД ступеня.

Із усіх розглянутих вище параметрів головними є коефіцієнти швидкості. При  $\varphi = \psi$  їх збільшення з 0,9 до 0,95 призводить до підвищення економічності турбінного ступеня приблизно на 10 %.

#### Вплив параметрів нециліндричності течії, кутів потоку $\alpha_1$ , $\beta_2$ та режимних критеріїв $\lambda_\phi$ , $u_2/C_\phi$ на ступінь реактивності і гідравлічний ККД ступеня

Вплив параметрів нециліндричності течії  $\bar{F}$ ,  $\gamma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\bar{u}$  на роботу елементарного турбінного ступеня було досліджено в [1]. В якості вихідного варіанта обраний «газотурбінний» варіант 1 з великими кутами потоку  $\alpha_1 = 25^\circ$ ,  $\beta_2 = 30^\circ$ , який при невеликій  $\lambda_\phi = 0,508$  і оптимальному відношенні швидкостей  $u_2/C_\phi = 0,525$  працює з  $\rho = 0,3$  (інші параметри ступеня наведені у табл. 1).

Аналіз формули (1) вказує на те, що питома швидкість  $\lambda_{C_{1t}}$  не залежить від того, яким чином

сформований комплекс  $\frac{\bar{F}}{\sin \beta_2 \cos \sigma_2}$ . Тому змен-

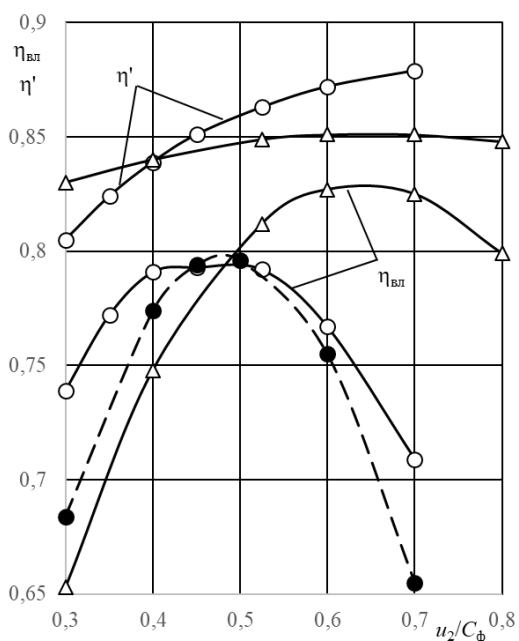
шення  $\cos \sigma_2$  в 1,117 рази (перехід до варіанта 2) або збільшення  $\bar{F}$  в 1,117 рази (перехід до варіанту 4) підвищує ступінь реактивності і зменшує ККД  $\eta'$  на 0,2 % (рис. 9). Параметри  $\bar{F}$ ,  $\beta_2$ ,  $\sigma_2$  суттєво змінюють ступінь реактивності, але після знаходження  $\rho$  за допомогою формули (3) можна побудувати лінію  $\eta' = f(\rho, u_2/C_\phi, \varphi, \psi, m)$ , вздовж якої змінюється комплекс  $\frac{\bar{F}}{\sin \beta_2 \cos \sigma_2}$ . Для

варіантів 1, 2, 4 комплекс  $m = 0,9063$  (рис. 9).

Розрахунки за формулами (1) – (3) показали, що при зменшенні комплексу  $m = \bar{u} \cos \alpha_1 \cos \gamma_1$  до 0,852 за рахунок будь-якого з цих трьох параметрів ККД  $\eta'$  погіршується на 0,5 % – 1 %. При цьому збільшення кута  $\gamma_1$  до  $20^\circ$  (варіант 3) і падіння відношення  $\bar{u}$  до 0,94 (варіант 9) супроводжується зменшенням  $\rho$ , а збільшення кута  $\alpha_1$  до  $31,6^\circ$  (варіант 12) до підвищення  $\rho$  (рис. 9).

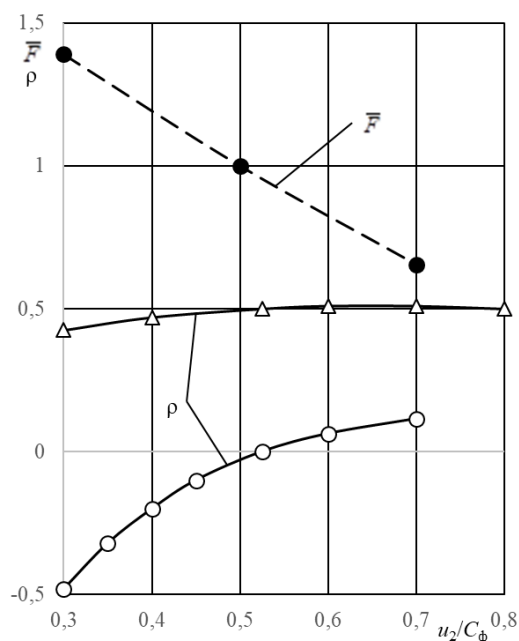
Порівняння формул (1) та (3) вказує на те, що ступінь реактивності  $\rho$  в формулі (3) може бути сформована шляхом різного поєднання параметрів  $\bar{F}$ ,  $\beta_2$ ,  $\sigma_2$ ,  $k$ ,  $\lambda_\phi$ , які відсутні в формулі (3). На лініях  $m = 0,9063$ ,  $m = 0,852$ , побудованих на рис. 9 для групи ступенів з  $\varphi = 0,95 > 0,9 = \psi$  і  $u_2/C_\phi = 0,525$ , режимний критерій  $\lambda_\phi$  (як і параметри  $\bar{F}$ ,  $\beta_2$ ,  $\sigma_2$ ,  $k$ ) може приймати будь-яке значення. При переході від варіанта 1 з  $\lambda_\phi = 0,508$  до варіанта 14 з  $\lambda_\phi = 1,0$  ступінь реактивності зростає з 0,3 до 0,414, а ККД  $\eta'$  зменшується на 0,3 %. Зрозуміло, що для інших співвідношень між  $\varphi$  і  $\psi$  і інших діапазонів зміни  $\rho$  вплив критерія  $\lambda_\phi$  може бути якісно іншим і більш значущим (рис. 8).

Більш суттєво ніж  $\lambda_\phi$  на ККД  $\eta'$  впливає режимний критерій  $u_2/C_\phi$ , зменшення якого з 0,525 до 0,35 у разі переходу від варіанту 1 до варіанту 10 погіршує цей ККД на 2 % (рис. 9 та табл. 1).



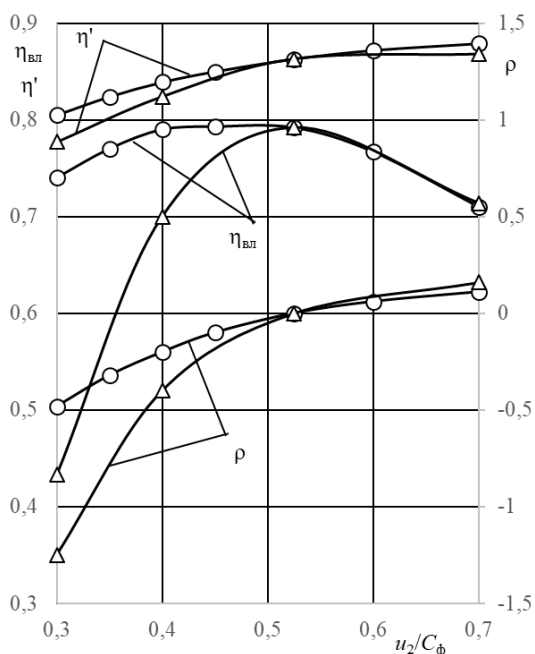
○ – активний ступінь при  $\beta_2 = 30^\circ$ ;  
 Δ – реактивний ступінь при  $\beta_2 = 13,25^\circ$ ;  
 --- ● --- група ступенів з  $\rho = 0$

Рис. 3 – Вплив  $u_2/C_\phi$  на економічність активного і реактивного ступенів при  $\alpha_1 = 13^\circ$ ,  $\varphi = 0,95$ ,  $\psi = 0,9$ ,  $\bar{F} = 0,95$ ,  $\lambda_\phi = 0,508$ ,  $\gamma_1 = 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\bar{u} = 1$ ,  $k = 1,4$



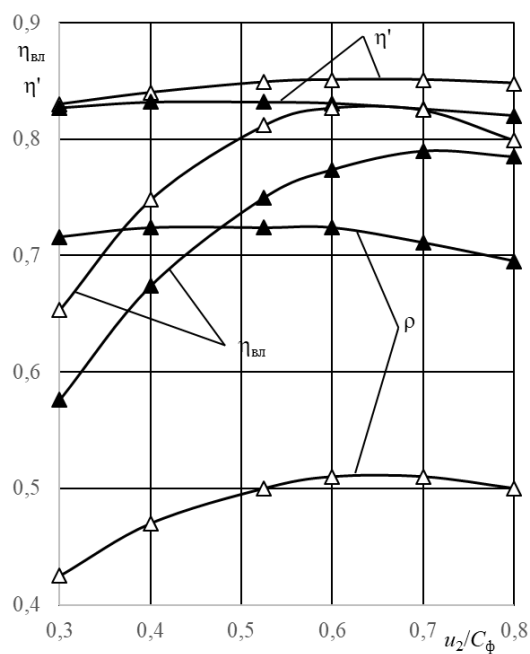
○ – активний ступінь; Δ – реактивний ступінь;  
 --- ● --- параметр  $\bar{F}$  для групи ступенів з  $\rho = 0$

Рис. 4 – Вплив  $u_2/C_\phi$  на ступінь реактивності активного і реактивного ступенів при  $\alpha_1 = 13^\circ$ ,  $\varphi = 0,95$ ,  $\psi = 0,9$ ,  $\lambda_\phi = 0,508$ ,  $\gamma_1 = 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\bar{u} = 1$ ,  $k = 1,4$



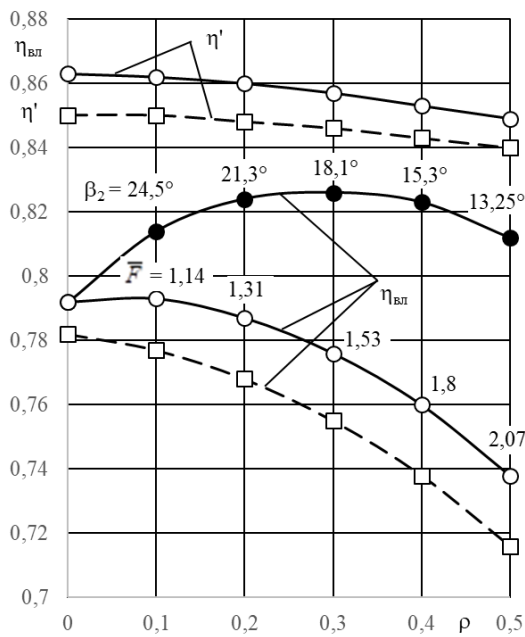
○ –  $\lambda_\phi = 0,508$ ; Δ –  $\lambda_\phi = 1,2$

Рис. 5 – Вплив  $\lambda_\phi$  і  $u_2/C_\phi$  на роботу активного ступеня при  $\alpha_1 = 13^\circ$ ,  $\varphi = 0,95$ ,  $\psi = 0,9$ ,  $\bar{F} = 0,95$ ,  $\gamma_1 = 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\bar{u} = 1$ ,  $k = 1,4$



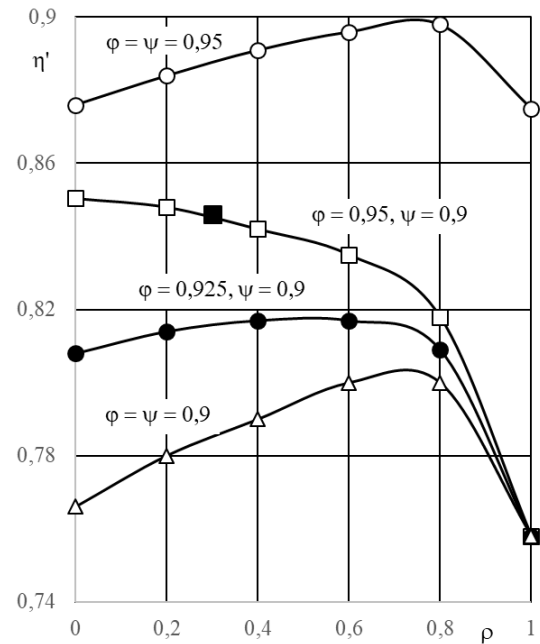
Δ –  $\lambda_\phi = 0,508$ ; ▲ –  $\lambda_\phi = 1,2$

Рис. 6 – Вплив  $\lambda_\phi$  і  $u_2/C_\phi$  на роботу реактивного ступеня при  $\alpha_1 = 13^\circ$ ,  $\varphi = 0,95$ ,  $\psi = 0,9$ ,  $\bar{F} = 0,95$ ,  $\gamma_1 = 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\bar{u} = 1$ ,  $k = 1,4$



● –  $\alpha_1 = 13^\circ, \bar{F} = 0,95$ ; ○ –  $\alpha_1 = 13^\circ, \beta_2 = 30^\circ$ ;  
□ –  $\alpha_1 = 25^\circ, \beta_2 = 30^\circ$

Рис. 7 – Вплив параметрів  $\beta_2, \alpha_1, \bar{F}$  на роботу групи ступенів при  $\varphi = 0,95, \psi = 0,9, \gamma_1 = 0, \sigma_2 = 0, \bar{u} = 1$  на режимі з  $\lambda_\phi = 0,508, u_2/C_\phi = 0,525$



■ – варіант 1 з  $\bar{F} = 0,87, \lambda_\phi = 0,508$

Рис. 8 – Вплив співвідношення між  $\varphi$  і  $\psi$  на гідравлічний ККД ступені з різним рівнем ступня реактивності при  $\alpha_1 = 25^\circ, \gamma_1 = 0, \bar{u} = 1, u_2/C_\phi = 0,525$

Таблиця 1 – Вплив параметрів нециліндричності  $\gamma_1, \sigma_2, \bar{u}, \bar{F}$ , режимних критеріїв  $u_2/C_\phi, \lambda_\phi$  і кута потоку  $\alpha_1$  на роботу групи ступенів з  $\varphi = 0,95 > 0,9 = \psi, k = 1,4, \beta_2 = 30^\circ$

Параметр	Варіант									
	1	2	3	4	9	10	11	12	13	14
$\gamma_1$	0		20°	0						
$\sigma_2$	0	26,5	0							
$\bar{u}$	1,0				0,94	1,0				
$\bar{F}$	0,87			0,972	0,87					
$u_2/C_\phi$	0,525					0,35	0,65	0,525		
$\lambda_\phi$	0,508									1,0
$\alpha_1$	25°							31,6°	15,3°	25°
$\rho$	0,3	0,383	0,207	0,383	0,260	0,198	0,326	0,422	0,025	0,414
$\eta'$	0,8462	0,8440	0,8386	0,8440	0,838	0,826	0,851	0,834	0,856	0,843
$\eta_{вл}$	0,7547	0,6800	0,7492	0,7405	0,7422	0,6822	0,7444	0,7143	0,7916	0,733

### Висновки

1 Ступінь реактивності і економічність кожного елементарного турбінного ступеня визначається режимними критеріями  $u_2/C_\phi, \lambda_\phi$ , газодинамічними характеристиками соплової і робочої решіток  $\varphi, \alpha_1, \gamma_1, \psi, \beta_2, \sigma_2$ , параметрами нециліндричності  $\bar{F}, \bar{u}$  і практично не залежить від коефіцієнта адиабати робочого тіла.

2 При зменшенні будь-яким чином комплексу  $\bar{u} \cos \alpha_1 \cos \gamma_1$  приблизно на 6 % приблизно на 1 % погіршується гідравлічний ККД  $\eta'$ , величина якого

залежить від того, як при цьому змінився ступінь реактивності  $\rho$  (рис. 9).

3 В умовах, коли коефіцієнт швидкості  $\varphi$  суттєво перевищує коефіцієнт швидкості  $\psi$ , зменшення кута потоку  $\beta_2$  підвищує ступінь реактивності, оптимальне відношення швидкостей  $u_2/C_\phi$  для ККД  $\eta_{вл}$ , цей ККД, але зменшує гідравлічний ККД  $\eta'$  (рис. 3), який є визначальним параметром для більшості ступенів багатоступінчастих турбін. У разі переходу в частинах високого тиску (ЧВТ) потужних парових турбін від активного облопачування до реактивного його висота і обидва

коефіцієнти швидкості зростають, різниця між  $\varphi$  та  $\psi$  зменшується, що призводить до зростання гідравлічного ККД ЧВТ [13].

4 Вплив на ККД  $\eta'$  режимного критерія  $\lambda_\phi$  або комплексу  $\frac{\bar{F}}{\sin\beta_2 \cos\sigma_2}$  залежить від

співвідношенні між коефіцієнтами швидкості  $\varphi$  і  $\psi$ . В нормальних умовах на номінальному режимі, коли коефіцієнт швидкості  $\varphi$  набагато більше ніж  $\psi$ , збільшення  $\lambda_\phi$  з 0,5 до 1,0, або вказаного комплексу на 12 % зменшує ККД  $\eta'$  лише на 0,2 % – 0,3 % (рис. 9).

5 В умовах, коли коефіцієнти швидкості  $\varphi$  і  $\psi$  однакові (рис. 8), збільшення ступіня реактивності з 0 до 0,8 за рахунок підвищення комплексу  $\frac{\bar{F}}{\sin\beta_2 \cos\sigma_2}$ , або сумісного підвищення цього комплексу і критерія  $\lambda_\phi$  супроводжується зростанням гідравлічного ККД більш ніж на 2 %.

#### Інформація щодо наборів даних

Нові набори даних у рамках цього дослідження не створювалися.

#### Заява про внесок авторів

Лапузін О. В.: концептуалізація, методологія, написання початкового варіанту статті.

Суботович В. П.: збір та аналіз літературних даних, редагування.

Юдін Ю. О.: збір та узагальнення літературних даних.

Науменко С. П.: перевірка результатів розрахунків, редагування.

Усі автори ознайомилися з остаточною версією рукопису та погодилися з її публікацією.

#### Заява щодо фінансування та подяки

Це дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

#### Заява щодо конфлікту інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### Заява щодо використання інструментів штучного інтелекту

Інструменти штучного інтелекту не використовувалися.

#### Список літератури

- Лапузін О. В. Вплив параметрів нециліндричності течії на показники економічності елементарного турбінного ступеня / О. В. Лапузін, В. П. Суботович, Ю. О. Юдін, С. П. Науменко, О. Ю. Юдін // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2025. – № 1(19). – С. 16–28. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2025.01.02>.
- Stodola, A. Dampf- und Gasturbinen. Mit einem Anhang über die Aussichten der Wärmekraftmaschinen / A. Stodola. – Nachtrag zur 5. Auflage. – Berlin: Springer, 1924. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-50854-7>.

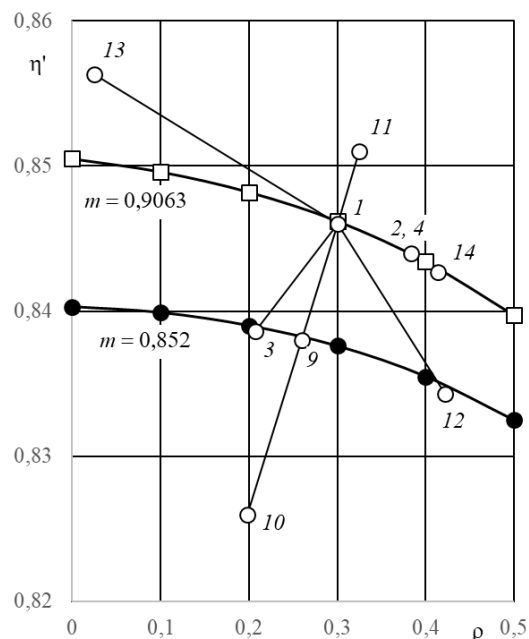


Рис. 9 – Вплив параметрів  $\alpha_1$ ,  $\gamma_1$ ,  $\bar{u}$ ,  $\bar{F}$ ,  $u_2/C_\phi$ ,  $\lambda_\phi$  на гідравлічний ККД ступенів з  $\varphi = 0,95$ ,  $\psi = 0,9$ : 1, 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14 – номери режимів (див. табл. 1)

- Gostelow J. P. Cascade Aerodynamics / J. P. Gostelow. – Oxford ; New York : Pergamon Press, 1984, Vol. XVI. – 270 p. – ISBN 9780080204277.
- Lakshminarayana B. Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery / B. Lakshminarayana. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 1996. – ISBN 0-471-85546-4, ISBN 9780471855460 (print). – DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470172629>.
- Yadav R. Steam & Gas Turbines and Power Plant Engineering (7th Revised and Enlarged Edition, SI Units) / R. Yadav. – Prayagraj: Central Publishing House, 2004. – 1108 p. – URL: <https://pdfcoffee.com/steam-gas-turbines-and-power-plant-engineering-r-yadav-pdf-free.html> (дата звернення 23.04.2026).
- Craig, H. R. M. Performance Estimation of Axial Flow Turbines / H. R. M. Craig, H. J. A. Cox // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 1970. – Vol. 185, Is. 1. – DOI: [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1970\\_185\\_048\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1970_185_048_02).
- Perdichizzi A. Mach Number Effects on Secondary Flow Development Downstream of a Turbine Cascade / A. Perdichizzi // Journal of Turbomachinery. – 1990. – Vol. 112(4). – PP. 643–651. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2927705>.
- Moustapha S. H. Aerodynamic Performance of a Transonic Low Aspect Ratio Turbine Nozzle / S. H. Moustapha, W. E. Carscallen, J. D. McGeachy // Journal of Turbomachinery. – 1993. – Vol. 115(3). – PP. 400–408. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2929267>.
- Davies M. Operation and Preliminary Measurements from a New Transonic Wind Tunnel / M. Davies, E. Breathnach // Proceedings of the XVth Bi-Annual Symposium on Measuring Techniques in transonic and Supersonic Flows in Cascades and Turbomachines. 21-22 September 2000, Firenze/Italy. – 2000. – MTT1500-A101. – URL: <https://www.meastechturbo.com/paper-archives/mtt1500-firenze> (дата звернення 23.04.2026).
- Jouini D. B. M. Aerodynamic Performance of a Transonic Turbine Cascade at Off-Design Conditions Available to Purchase / D. B. M. Jouini, S. A. Sjolander, S. H. Moustapha // Journal of Turbomachinery. – 2001. – Vol. 123(3). – PP. 510–518. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1370157>.

11. Лапузін О. В. Вплив чисел Маха і Рейнольдса на аеродинамічні характеристики солової решітки газової турбіни / О. В. Лапузін, В. П. Суботович, Ю. О. Юдін, С. П. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2024. – № 1(17). – С. 21–29. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.01.03>.
12. Лим Ч. С. Разработка метода прогнозирования характеристик турбины на основе экспериментального моделирования газодинамических процессов : дис. ... канд. техн. наук ; 05.05.16 – Турбомашины и турбоустановки / Чан Сан Лим. – Харьков : НТУ «ХПІ», 2012. – 157 с.
13. Лапузін О. В. Аналіз впливу типу облопачування на економічність частин високого тиску парових турбін / О. В. Лапузін, Ю. О. Юдін, С. П. Науменко, О. Ю. Юдін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXIV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2026, 13–16 травня 2026 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харьков : НТУ «ХПІ», 2026. – С. 39. – ISSN 2786-9253 (on-line). – URL: [https://iiii-my.sharepoint.com/personal/artem\\_zakharov\\_khpi\\_edu\\_ua/\\_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal%2Fartem\\_zakharov\\_khpi\\_edu\\_ua%2FDocuments%2F3бiрник%20тез%20MicroCAD-2026%2Epdf&parent=%2Fpersonal%2Fartem\\_zakharov\\_khpi\\_edu\\_ua%2FDocuments&ga=1](https://iiii-my.sharepoint.com/personal/artem_zakharov_khpi_edu_ua/_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal%2Fartem_zakharov_khpi_edu_ua%2FDocuments%2F3бiрник%20тез%20MicroCAD-2026%2Epdf&parent=%2Fpersonal%2Fartem_zakharov_khpi_edu_ua%2FDocuments&ga=1) (дата звернення 23.04.2026).

## References (transliterated)

1. Lapuzin O., Subotovich V., Yudin Yu., Naumenko S., Yudin O. (2025), "The Parameters Influence of Noncylindrical Flow on the Elementary Turbine Stage Efficiency Criteria", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 1(19), pp. 16–28, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2025.01.02>.
2. Stodola, A. (1924), *Dampf- und Gasturbinen. Mit einem Anhang über die Aussichten der Wärmekraftmaschinen*, Nachtrag zur 5. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-50854-7>.
3. Gostelow J. P. (1984), *Cascade Aerodynamics*, Pergamon Press, New York, Vol. XVI, 270 p., ISBN 9780080204277.
4. Lakshminarayana B. (1996), *Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996, ISBN 0-471-85546-4, ISBN 9780471855460 (print), <https://doi.org/10.1002/9780470172629>.
5. Yadav R. (2004), *Steam & Gas Turbines and Power Plant Engineering (7th Revised and Enlarged Edition, SI Units)*, Central Publishing House, Prayagraj, 1108 p., Access mode: <https://pdfcoffee.com/steam-gas-turbines-and-power-plant-engineering-r-yadav-pdf-free.html> (accessed 23 April 2026).
6. Craig, H. R. M., Cox H. J. A. (1970), "Performance Estimation of Axial Flow Turbines", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 185, is. 1, [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1970\\_185\\_048\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1970_185_048_02).
7. Perdichizzi A. (1990), "Mach Number Effects on Secondary Flow Development Downstream of a Turbine Cascade", *Journal of Turbomachinery*, vol. 112(4), pp. 643–651, <https://doi.org/10.1115/1.2927705>.
8. Moustapha S. H., Carscallen W. E., McGeachy J. D. (1993), "Aerodynamic Performance of a Transonic Low Aspect Ratio Turbine Nozzle", *Journal of Turbomachinery*, vol. 115(3), pp. 400–408, <https://doi.org/10.1115/1.2929267>.
9. Davies M., Breathnach E. (2000), "Operation and Preliminary Measurements from a New Transonic Wind Tunnel", *Proceedings of the XVth Bi-Annual Symposium on Measuring Techniques in transonic and Supersonic Flows in Cascades and Turbomachines. 21-22 September 2000, Firenze/Italy*, MTT1500-A101, Access mode: <https://www.meastechturbo.com/paper-archives/mtt1500-firenze> (accessed 23 April 2026).
10. Jouini D. B. M., Sjolander S. A., Moustapha S. H. (2001), "Aerodynamic Performance of a Transonic Turbine Cascade at Off-Design Conditions Available to Purchase", *Journal of Turbomachinery*, vol. 123(3), pp. 510–518, <https://doi.org/10.1115/1.1370157>.
11. Lapuzin A., Subotovich V., Yudin Yu., Naumenko S. (2024), "The Effect of Mach and Reynolds Numbers on the Aerodynamic Characteristics of the Nozzle Cascade of a Gas Turbine", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 1(17), pp. 21–29, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.01.03>.
12. Lim Chan Sun (2012), *Razrobotka metoda prognozirovaniya kharakteristik turbiny na osnove eksperimental'nogo modelirovaniya gazodinamicheskikh protsessov* [A method for the prediction of turbine performance characteristics through the experimental simulation of gas dynamic processes], Ph.D. Thesis.
13. Lapuzin A., Yudin Yu., Naumenko S., Yudin O. (2026), "Analiz vplyvu typu oblopachuvannja na ekonomichnist' chastyh vysokogo tysku parovyh turbin [Analyzing the effect of the type of blading on the efficiency of the highly pressurized parts of steam turbines], *Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health: Abstracts XXXIV International Scientific-Practical Conference MicroCAD-2026, 13–16 May*, pp. 39, ISSN 2786-9253 (on-line), Access mode: [https://iiii-my.sharepoint.com/personal/artem\\_zakharov\\_khpi\\_edu\\_ua/\\_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal%2Fartem\\_zakharov\\_khpi\\_edu\\_ua%2FDocuments%2F3бiрник%20тез%20MicroCAD-2026%2Epdf&parent=%2Fpersonal%2Fartem\\_zakharov\\_khpi\\_edu\\_ua%2FDocuments&ga=1](https://iiii-my.sharepoint.com/personal/artem_zakharov_khpi_edu_ua/_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal%2Fartem_zakharov_khpi_edu_ua%2FDocuments%2F3бiрник%20тез%20MicroCAD-2026%2Epdf&parent=%2Fpersonal%2Fartem_zakharov_khpi_edu_ua%2FDocuments&ga=1) (accessed 23 April 2026).

Надійшла (received) 21.04.2026  
 Прийнята (accepted) 16.05.2026  
 Публікація (published) 29.05.2026

## Відомості про авторів / About the Authors

**Лапузін Олександр Вікторович (Lapuzin Olexander)** – кандидат технічних наук, доцент; доцент кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [alexlapuzin14@gmail.com](mailto:alexlapuzin14@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6445-3979>.

**Суботович Валерій Петрович (Subotovich Valery)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник; провідний науковий співробітник відділу термогазодинаміки енергетичних машин № 33 Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного, м. Харків, Україна; e-mail: [subotovych@ukr.net](mailto:subotovych@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7051-4758>.

**Юдін Юрій Олексійович (Yudin Yuriy)** – кандидат технічних наук, доцент; професор кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [yugy5yudin@ukr.net](mailto:yugy5yudin@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9770-2273>.

**Науменко Світлана Петрівна (Naumenko Svetlana)** – старший викладач кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [svitlana.naumenko@khpi.edu.ua](mailto:svitlana.naumenko@khpi.edu.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2825-8199>.