

## ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХНІ ОХОЛОДЖЕННЯ КРОМКИ ЛОПАТКИ ОСЬОВОЇ ТУРБИНИ

*Національний університет кораблебудування  
ім. адмірала Макарова, Україна*

*Запропоновано метод формування поверхонь вхідних кромок, що зітктовують поверхні охолодження спинки та коритця лопатки осьової турбіни зі ступенем гладкості першого порядку. Метод дозволяє визначити геометричні параметри еліптичних кривих, за якими, відштовхуючись від заданих поверхонь охолодження спинки та коритця, формуються конгруентні ним поверхні охолодження кромки лопатки.*

**Постановка проблеми.** Одним із шляхів подальшого розвитку сучасного газотурбобудування є постійне зростання температури газів перед турбінним відсіком газотурбінного двигуна. Це дозволяє отримувати підвищені значення ефективних показників газових турбін і, як наслідок, зменшувати витрати палива. Зростання температури газів перед турбіною, забезпечення заданого ресурсу та надійності двигуна можливе за рахунок створення нових жароміцних матеріалів, застосування покриттів лопаток турбін, а також, головним чином, за рахунок застосування ефективних способів охолодження гарячих деталей двигуна. Ці заходи особливо актуальні для соплових і робочих лопаток перших ступенів турбіни.

Здійснення високоефективного охолодження та захисту лопаток від дії гарячих газів можливе за рахунок застосування систем охолодження, в яких охолоджуючою речовиною виступає повітря, що відбирається після компресорного відсіку двигуна. Широкого розповсюдження набули системи охолодження, в основу яких покладена оболонкова конструкція лопатки, зокрема лопатки з дефлекторною системою охолодження [5].

Удосконалення таких складних технічних елементів, якими є охолоджені лопатки, скорочення термінів розробки їх нових зразків, можливе лише за наявності відповідних математичних моделей опису геометрії їх конструкцій. Вже на стадії проектування вони дозволяють підвищувати точність прогнозування основних характеристик об'єкта та виявляти недоліки пропонуваніх проектних рішень. У роботі [3] розглядалися питання геометричного моделювання поверхонь охолодження оболонкової конструкції лопатки, де основна увага була спрямована саме на моделювання поверхонь спинки та коритця охолоджуваної лопатки. Але в цій роботі питання ретельного моделювання внутрішньої поверхні кромки, що взаємодіє з охолоджуючою речовиною, не розглядалося.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [4, 5] розглядаються схеми охолодження робочих елементів проточних частин турбін, робиться

висновок, що оболонкові конструкції, тобто конструкції з дефлекторною системою охолодження, є більш перспективними для охолодження соплових лопаток. У зарубіжних виданнях з опублікованими дослідженнями корпорацій General Electric та Rolls-Royce, які розглянуті у роботах [1, 2], пропонується для опису кромки лопаток використовувати поверхні, що в перерізі мають дуги еліпсів. У роботі [6] розглядається плівкова схема охолодження кромки перфоруванням в них додаткових каналів. У попередній роботі авторів [3], де пропонувалося моделювання оболонки лопатки з дефлекторною системою охолодження, основна увага була спрямована на поверхні охолодження спинки та коритця і майже не досліджувалися питання моделювання поверхонь плавного переходу між ними. За вихідні параметри моделювання приймалися характеристики робочої поверхні кромки, що не дозволяло забезпечити достатню плавність у місцях її стикування.

**Формування цілей статті.** Ця робота є подальшим розвитком ідей, запропонованих в статті [3] щодо побудови геометричних моделей оболонкових конструкцій лопаток осевих турбін з системою внутрішнього охолодження. Метою роботи є розробка моделей геометричного представлення поверхні охолодження кромки лопатки осевої турбіни. Запропонована поверхня охолодження формується поверхнею Безье шляхом досягнення її конгруенції еліптичним дугам, що забезпечують плавне стикування обводів охолодження спинки та коритця в перерізах лопатки.

**Основна частина.** Поверхню вхідної кромки лопатки високотемпературної турбіни, яка омивається охолоджуючим повітрям, далі іменованою як поверхня охолодження та позначеною  $S_{LE}^*(u, v, \omega)$ , формуємо подібно тому, як це зроблено при геометричному моделюванні зовнішньої (надалі робочої) поверхні цієї кромки. Геометричне моделювання робочої поверхні вхідної кромки, яка взаємодіє з газом високої температури, розглянуто в роботі [1]. Вхідна кромка описується поверхнею Безье, що апроксимує відповідний характеристичний багатогранник, який визначений конгруенцією, тобто геометричним збігом, утвореної ним поверхні і еліптичних дуг, де методику побудови останніх викладено у роботі [2]. Рівняння поверхні має наступний вигляд:

$$S(u, v, \omega) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,n,j,m} R_{i,j}(u, v, \omega), \quad i \in [0, n], \quad j \in [0, m]. \quad (1)$$

На рис. 1 зображено формування еліптичних дуг вхідної кромки, що визначаються спільним центром  $O_1$ . Вузлові точки  $C_1^*$ ,  $K_1^*$  є точками стикування обводів спинки 1 та коритця 2 з дугою вхідної кромки 3, які відповідають поверхням охолодження. Координати цих точок визначаються умовами побудови оболонки лопатки та збігаються з координатами відповідних крайніх вершин  $B_{i,0}^*$  спинки та коритця обводів зі сторони охолодження.

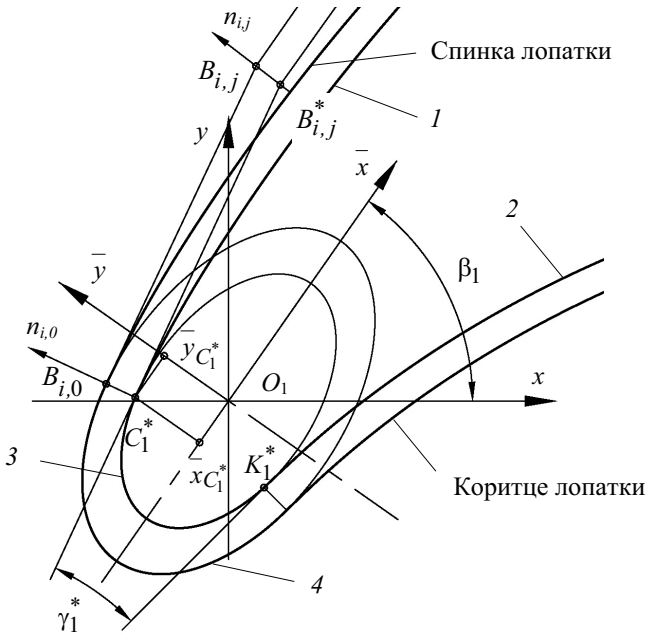


Рис. 1. Обводи вхідної кромки лопатки

Вершини багатогранників поверхонь охолодження спинки та коритця  $B_{i,n,j,m}^*$  визначаються зміщенням відповідних вершин  $B_{i,n,j,m}$  робочих поверхонь у напрямку нормалей, що проводяться до відповідної робочої поверхні [3]. Оскільки кожен обвід поверхні спинки або коритця криволінійний, то зазначені нормалі перетинаються у відповідній площині характерного перерізу під деякими кутами, тобто вузли ламаної переміщуються не рівномірно. Це призводить до відмінності довжини дуг обводів робочих та охолоджуваних поверхонь та відсутності взаємної конгруенції при базуванні їх у вершинах стикування кромки. Отже, значення похідних у крайніх точках робочого та охолоджуваного обводів вхідної кромки відрізняються. З урахуванням цього можна зазначити, що застосування еліптичних параметрів  $k$ ,  $r_{LE}$  та кута  $\gamma_1$  робочої поверхні кромки 4, якими при визначенні вершин багатогранника поверхні охолодження передньої кромки оперує методика [1], не забезпечить стикування кромки з обводами спинки та коритця охолоджуваних поверхонь у точках  $C_1^*$ ,  $K_1^*$  зі ступенем гладкості першого порядку.

Задача зводиться до пошуку параметрів еліптичності охолоджуваної кромки  $k^*$  та  $r_{LE}^*$ , що обумовляють таку еліптичну криву, яка б проходила через точки стикування  $C_1^*$ ,  $K_1^*$  у кожному характерному перерізі лопатки.

Метод, що пропонується, оперує наступними вихідними даними:  $B_{i,j}^*$  – функція компонент векторів вершин характеристичного багатогранника спинки та коритця поверхонь охолодження  $S^*(u, v, \omega)$ , які визначаються за методом, викладеним в роботі [3], та є базою для побудови поверхні охолодження кромки; кількість вузлів  $n$  в перерізах  $i$  та інші приймаються такими, що відповідають робочій поверхні кромки. Невідомими величинами є кут загострення кромки  $\gamma_1^*$  в  $i$ -му перерізі, значення меншої півосі дуги еліптичної кромки  $r_{LEi}^*$  та коефіцієнт еліптичності дуги  $k_i^*$  охолоджуваного обводу.

Моделювання обводу кромки задовольнить умови стикування кромки з обводами охолоджуваної поверхні зі ступенем гладкості першого порядку, якщо значення похідних в точках стикування еліптичної дуги є відповідними значенням дотичних, що проведені згідно куту загострення кромки  $\gamma_1^*$ , який визначається за наступним виразом:

$$\gamma_1^* = \arctg\left(\tau'_{C_1^*}\right) - \arctg\left(\tau'_{K_1^*}\right),$$

де  $\tau'_{C_1^*}$ ,  $\tau'_{K_1^*}$  – значення похідних у точках стикування обводів спинки та коритця охолоджуваних поверхонь лопатки, визначення яких розглядалося в роботі [3].

Коефіцієнт еліптичності  $k^*$  знаходимо шляхом сумісного розв'язання двох виразів, що визначають похідні рівняння еліпсу та дотичного відрізка ламаної обводу у точці  $B_{i,0}^*$ :

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma_1^*}{2}\right) = -\frac{\bar{x}_{C_1^*} r_{LE}^*}{\left(r_{LE}^* \cdot k^*\right)^2} \left(1 - \frac{\bar{x}_{C_1^*}^2}{\left(r_{LE}^* \cdot k^*\right)^2}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

де  $\bar{x}_{C_1^*}$ ,  $\bar{y}_{C_1^*}$  – координати точки  $C_1^*$  у системі координат  $\bar{x} \bar{y}$ ;

$\gamma_1^*$  – кут нахилу дотичної до обводу спинки у крайній точці  $B_{i,0}^*$ .

Координати  $\bar{x}_{C_1^*}$ ,  $\bar{y}_{C_1^*}$  визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{C_1^*} &= X_C \cos \beta_1 + Y_C \sin \beta_1; \\ \bar{y}_{C_1^*} &= -X_C \sin \beta_1 - Y_C \cos \beta_1, \end{aligned}$$

де  $X_C = X_{i,0}^* - \Delta x$ ,  $Y_C = Y_{i,0}^* - \Delta y$ .

Величини  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  визначають положення точки  $O_1$  (розглянуто в роботі [2]);  $X_{i,0}^*$ ,  $Y_{i,0}^*$  – величини, що визначають положення вузлової точки  $C_1^*$  у системі координат  $xu$ .

Враховуючи умову, за якої точка  $C_1^*$  належить еліптичній дузі, можна знайти параметр  $r_{LE}^*$  з рівняння еліпсу. Після перетворень матимемо наступний вираз:

$$r_{LE}^* = \sqrt{\left(\frac{\bar{x}_{C_1^*}}{k}\right)^2 + (\bar{y}_{C_1^*})^2}. \quad (3)$$

Шляхом підстановки рівняння (3) до виразу (2), отримуємо вираз коефіцієнту еліптичності дуги охолоджуваної кромки:

$$k^* = \left( \frac{|\bar{x}_{C_1^*}|}{\bar{y}_{C_1^*} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma_1^*}{2}\right)} \right)^{0.5}.$$

Визначивши параметр  $k^*$  та підставивши його до рівняння (3), розрахуємо шуканий параметр значення меншої півосі  $r_{LE}^*$  поверхні охолодження.

Наступним кроком є визначення вектор-функції вершин  $B_{LE}^*$  багатогранника поверхні охолодження вхідної кромки, для чого використовуються одержані вихідні данні моделювання вхідної кромки на базі метода, викладеного в роботі [1]. Підставивши  $B_{LE}^*$  до рівняння (1), отримуємо можливість побудови поверхні охолодження вхідної кромки  $S_{LE}^*(u, v, \omega)$ , оскільки стає відомим положення вершин характеристичного багатогранника.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Розроблений метод моделювання поверхонь кромки лопатки осьової турбіни дозволяє створювати фрагменти поверхонь конгруенції еліптичних дуг, якими визначаються проміжні обводи кромки профілів. Сформовані поверхні поєднують між собою поверхні охолодження, забезпечуючи пелогість кривини в місцях їх стикування зі спинкою та коритцем, вузлові вершини яких є вихідними даними для побудови.

Подальші дослідження планується спрямувати у напрямку моделювання та вдосконалення елементів охолодження інших перспективних схем охолодження лопаток.

## Література

1. *Борисенко, В.Д.* Геометричне моделювання поверхонь еліптичних кромок лопаток осьових турбін / В.Д. Борисенко, Д.В. Котляр // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Мелітополь: Праці ТДАТУ, 2010. – Вип. 4. – Том 49. – С. 17–22.
2. *Борисенко, В.Д.* Геометричне моделювання еліптичних вхідних кромок профілів лопаток осьових турбін / В.Д. Борисенко, Д.В. Котляр // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Київ: КНУБА, 2010. – Вип. 85. – С. 5–10.
3. *Борисенко, В.Д.* Геометричне моделювання оболонки дефлектора охолоджуваних лопаток осьових турбін / В.Д. Борисенко, Устенко І.В., Д.В. Котляр // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА, 2011. – Вип. 87. – С. 84–89.
4. *Венедиктов, В.Д.* Газодинамика охлаждаемых турбин / В.Д. Венедиктов. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.: ил.
5. *Жаров Г. Г.* Судовые высокотемпературные газотурбинные установки / Г.Г. Жаров, Л.С. Венчулис. – Л.: Судостроение, 1973. – 359 с.
6. *Islami, S. B.* Computational investigation of film cooling from trenced holes near the leading edge of a turbine blade / S.B.Islami , S. P. Alavi Tabrizi, B.A. Jubran // Numerical heat transfer, Part A, 53: 2008, P. 308–322.

### ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ КРОМКИ ЛОПАТКИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ

*В. Д. Борисенко, Д. В. Котляр*

Предложен метод формирования поверхностей входных кромок, которые состыкуются поверхности охлаждения спинки и корытца лопатки осевой турбины за степенью гладкости первого порядка. Метод позволяет определять геометрические параметры эллиптических кривых, по которым, отталкиваясь от заданных поверхностей охлаждения спинки и корытца, формируются конгруэнтные им поверхности охлаждения кромки лопатки.

### GEOMETRICAL MODELING OF COOLING EDGE SURFACE OF AXIAL-FLOW TURBINE BLADE

*V. D. Borisenko, D. V. Kotlyar*

The method for modeling of leading edge surface is joined the suction and pressure surfaces of axial-flow turbine blade in accordance with the first order of smoothness is offered. The method is based on the cooling suction surface and the cooling pressure surface makes it possible to define elliptical parameters of curves which are the base for making congruent cooling edge surface of the blade.