

I. А. ПАЛЬКОВ, С. А. ПАЛЬКОВ, О. І. ІЩЕНКО, О. П. АВДЄЄВА

СТВОРЕННЯ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ТУРБИНИ К-1250-6,9/25 З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Розглядаються основні принципи, які використовуються при створенні проточних частин (ПЧ) циліндрів високого (ЦВТ), середнього (ЦСТ) і низького тисків (ЦНТ) турбіни К-1250-6,9/25. Описуються підходи до чисельного експерименту при проектуванні проточних частин, перевагою якого є менші трудові, часові і фінансові витрати та більша інформативність порівняно з фізичним експериментом над проточними частинами. При проектуванні проточних частин циліндрів високого і середнього тиску (ЦВСТ) чисельний експеримент виконується за допомогою методу тривимірних в'язких течій. Для цього побудована тривимірна модель облопачування проточної частини, яка складається з великої кількості скінчених об'ємів (елементів) у формі шестигранників, в кожному з яких виконується інтегрування рівнянь газової динаміки. При розробці ЦНТ використовується метод параметризації і аналітичного профілювання перетинів вінців лопаток, при якому профілі описуються кривими четвертого і п'ятого порядків з умовою забезпечення мінімального значення максимальної кривизни і монотонності зміни тривимірної геометрії лопатки вздовж висоти. Такий метод дозволяє отримати оптимальні профілі перетинів лопаток, які максимально відповідають лініям струму і мінімізувати профільні втрати енергії при обтіканні лопаток потоком.

Ключові слова: проточна частина, профіль лопатки, турбоустановки, чисельний метод, параметрична модель.

И. А. ПАЛЬКОВ, С. А. ПАЛЬКОВ, О. И. ИЩЕНКО, Е. П. АВДЕЕВА

СОЗДАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ К-1250-6,9/25 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Рассматриваются основные принципы, которые используются при создании проточных частей (ПЧ) цилиндров высокого (ЦВД), среднего (ЦСД) и низкого давления (ЦНД) турбины К-1250-6,9 / 25. Описываются подходы к численному эксперименту при проектировании проточных частей, преимуществом которого является уменьшение трудовых, временных и финансовых затрат и большая информативность по сравнению с физическим экспериментом над проточными частями. При проектировании проточных частей цилиндров высокого и среднего давления (ЦВСД) численный эксперимент выполняется с помощью метода трехмерных вязких течений. Для этого построена трехмерная модель облопачивания проточной части, состоящей из большого количества конечных объемов (элементов) в форме шестигранников, в каждом из которых выполняется интегрирование уравнений газовой динамики. При разработке ЦНД используется метод параметризации и аналитического профилирования сечений венцов лопаток, при котором профили описываются кривыми четвертого и пятого порядков с условием обеспечения минимального значения максимальной кривизны и монотонности изменения трехмерной геометрии лопатки вдоль высоты. Такой метод позволяет получить оптимальные профили сечений лопаток, которые максимально соответствуют линиям тока и минимизировать профильные потери энергии при обтекании лопаток потоком.

Ключевые слова: проточная часть, профиль лопатки, турбоустановки, численный метод, параметрическая модель.

I. PALKOV, S. PALKOV, O. ISHCENKO, O. AVDIEIEVA

DEVELOPING THE FLOW PATH FOR THE K-1250-6.9/25 TURBINE UNIT USING THE OPTIMAL DESIGN METHODS

The paper considers the main principles that are used to develop the flow paths (FP) of the high-pressure cylinders (HPC), intermediate-pressure cylinders (IPC), and low-pressure cylinders (LPC) for the K-1250-6.9/25 turbine unit. It describes approaches to the numerical experiment when designing flow paths, the advantage of which is lower labor, time and financial costs and higher informativeness compared to the physical experiment on flow paths. When designing the flow paths of high- and intermediate-pressure cylinders (HIPC), the numerical experiment is performed using the three-dimensional viscous-flow method. For this purpose, a three-dimensional model of the blade system in the flow path is built, which consists of a large number of finite volumes (elements) in the shape of hexagons, in each of which the integration of the equations of gas dynamics is performed. When developing LPC, the method of parameterization and analytical profiling of the blade crown sections is used, where the profiles are described by the curves of the fourth and fifth orders with the condition of providing the minimum value of the maximum curvature and monotonicity of variation of the three-dimensional blade geometry along height. This method allows obtaining the optimal profiles of the cross sections of the blades, which correspond to the current flow lines to the fullest extent, and minimizing the profile energy losses when the flow flows around the blades.

Key words: flow path, blade profile, turbine units, numerical method, parametric model.

Вступ

У сучасному світі досі потужні парові турбіни відіграють велику роль, тому що вони виробляють більше 80 % електроенергії у всьому світі. За оцінками міжнародного енергетичного агентства (IEA) [1] до 2035 року рівень світового споживання електроенергії зросте на 35–40 %, відповідно подібна тенденція буде спостерігатися і в Україні. Саме тому виникає необхідність проводи-

ти оновлення і модернізацію існуючого енергетичного обладнання, на підставі закону України про енергозбереження [2], так як більша частина електроенергії виробляється паровими турбінами.

На сьогодні, як і раніше, дуже важливу роль при проектуванні та доведенні проточних частин (ПЧ) турбомашин грає фізичний експеримент, а також створені на його основі емпіричні моделі. Однак, останні 15–20 років простежується тенденція збільшення в цьому процесі частки чисельного

© I. А. Пальков, С. А. Пальков, О. І. Іщенко, О. П. Авдєєва, 2021

експерименту або застосування на етапі проектування аналітичного профілювання максимальної кількості елементів ПЧ [3, 4].

Мета роботи

Мета роботи полягає у визначенні підходу до чисельного експерименту при проектуванні проточних частин, перевагою якого є менші трудові, часові і фінансові витрати та більша інформативність порівняно з фізичним експериментом над проточними частинами.

Постановка задачі

У даній роботі описані основні принципи, які використовуються при створенні ПЧ ЦВТ, ЦСТ і ЦНТ турбіни К-1250-6,9/25. Так, використовуючи чисельний експеримент, виконано розробку ПЧ ЦВСТ (рис. 1).

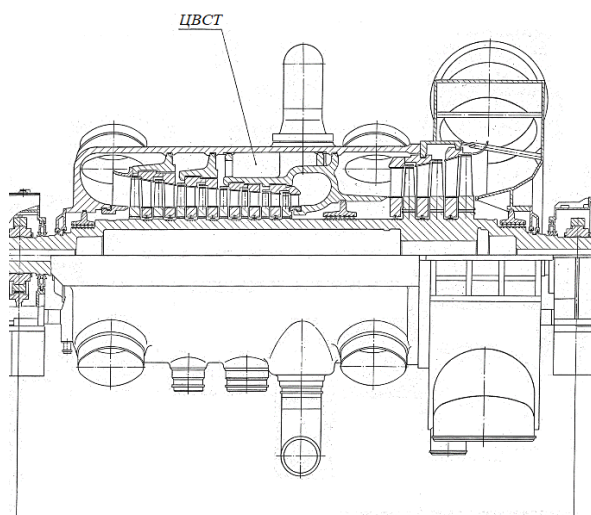


Рис. 1 – Поздовжній розріз ЦВСТ турбіни К-1250-6,9/25

Даний метод має ряд переваг в порівнянні з фізичним експериментом, серед яких є суттєво менші фінансові, трудові та часові витрати, а також більш висока інформативність одержуваних результатів. Тому актуальність розвитку, вдосконалення та використання в проектуванні чисельних моделей розрахунку просторових нестационарних газодинамічних процесів в ПЧ турбомашин різного типу очевидна.

Застосування саме зазначених вище методів розрахунку тривимірних в'язких течій дозволило виконати науково-дослідну роботу по темі «Розробка попереднього варіанту ПЧ ЦВСТ парової турбіни К-1250-6,9/25 на основі методів розрахунку тривимірних в'язких течій».

При створенні ПЧ ЦНТ використовувався дещо інший підхід. Застосовувався метод параме-

тризації і аналітичного профілювання вінців лопаток, в якому профілі лопаток описуються кривими четвертого і п'ятого порядків з умовою забезпечення мінімального значення максимальної кривизни [5, 6].

Створення ПЧ ЦВСТ

Застосовуваний в цій роботі чисельний метод забезпечив виконання таких важливих вимог, як: консервативність, ентропійна умова, монотонність і точність. Даний метод відноситься до розряду скінчено-об'ємних чисельних методів встановлення за часом, за допомогою якого виконується інтегрування рівнянь газової динаміки.

Фізична область відображається на розрахунок за допомогою різницевої сітки, що складається зі скінчених об'ємів (елементів), які являють собою прості геометричні фігури – тетраедри, піраміди, шестигранники і т. п. У цій роботі в якості скінченого об'єму розглядається шестигранник (гексаедр).

Для забезпечення консервативності в основу використовуваних методів закладено чисельне інтегрування рівнянь за скінченим об'ємом ΔV .

Елементи структурованих сіток, як правило, є шестигранниками. За допомогою структурованої сітки можна описати геометричні об'єкти досить простої форми, які відображаються на шестиграннику (рис. 2).

На основі серії варіаційних розрахунків з використанням представленого методу розроблена тривимірна модель облопачування ПЧ ЦВТ і ЦСТ турбіни К-1250-6,9/25, вид якої представлений на рис. 3.

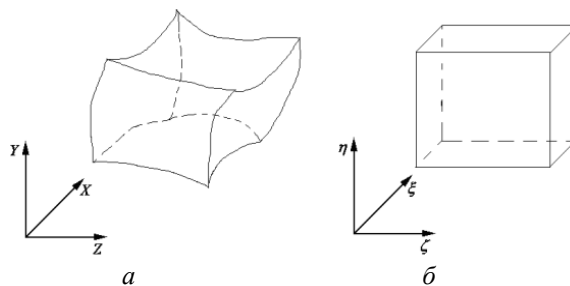


Рис. 2 – Відповідність між областями в фізичних і узагальнених координатах:
а – фізична область; б – область в узагальнених координатах

Створення ПЧ ЦНТ

Незважаючи на те, що на теперішній день аеродинамічне вдосконалення плоских решіток близько до межі, задача їх параметризації, як і раніше актуальна для подальшого розвитку наукового напрямку оптимального проектування ПЧ турбомашин. У багатьох випадках при зміні тривимірної

геометрії лопатки необхідно змінити і форму решітки профілів як з метою поліпшення обтікання, так і для забезпечення заданих інтегральних характеристик (масової витрати, теплового перепаду, реактивності та ін.).

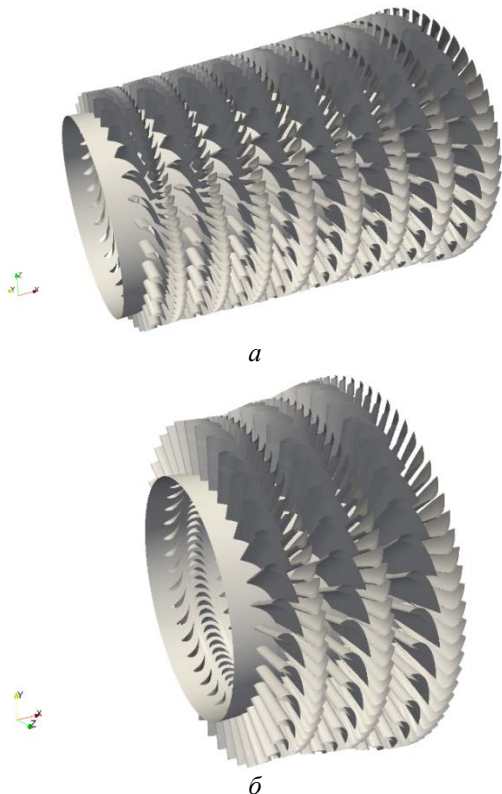


Рис. 3 – Візуалізація тривимірної моделі ПЧ циліндрів турбіни К-1250-6,9/25:
а – ЦВТ; б – ЦСТ

Одним із найбільш важливих критеріїв, які висуваються до профілізації лопаткових апаратів, є забезпечення мінімуму профільних втрат при обтіканні лопатки потоком [7].

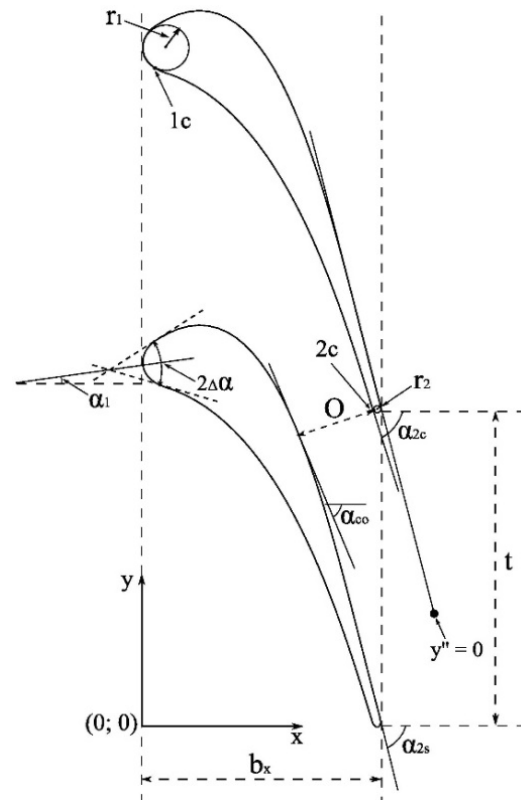


Рис. 4 – Решітка профілів

Забезпечення умови мінімального значення максимальної кривизни для кривих описуючих профіль дозволяє поліпшувати аеродинамічні властивості турбінних лопаток.

У використуваному при проектуванні ПЧ ЦНТ турбіни К-1250-6,9/25 методі параметризації і аналітичного профілювання [8] лопатки задаються довільним набором плоских профілів, кожен з яких розглядається в декартовій системі координат з віссю абсцис, паралельною осі турбіни, і віссю ординат, що збігається з фронтом решітки (рис. 4).

Профіль описується вхідною та вихідною кромками, а також кривими спинки й коритця. Вхідна і вихідна кромки є колами, а криві спинки і коритця – многочленами 5-го та 4-го порядку.

Величина горла визначається за заданим значенням кроку решітки та ефективним кутом

$$O = t \cos \alpha_{2ef}$$

Для зменшення числа параметрів, необхідних для аналітичного опису лопатки, вихідні дані задаються в деякому числі довільних перетинів (зазвичай 2–3). У цьому випадку крок решітки визначається по радіусу перетину та числу лопаток, а

вихідні дані для побудови профілів в необхідній кількості довільних перетинів обчислюються по квадратичним залежностям, що забезпечує монотонність зміни поверхні лопатки.

В результаті параметричного оптимізаційного процесу отримано розподіл ліній струму, описаних кубічними інтерполяційними сплайнами, які відповідають середнім лініям струминок течії ПЧ ЦНТ К-1250-6,9/25 (рис. 5).

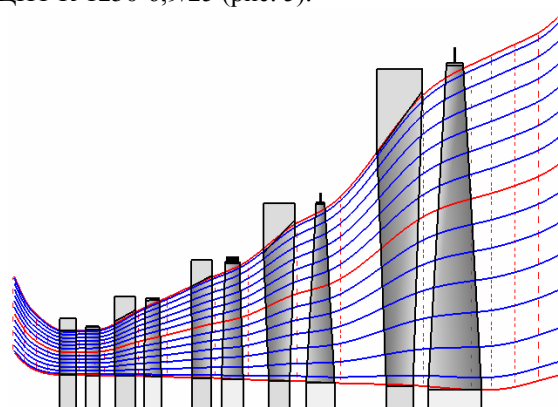


Рис. 5 – Лінії струму в ПЧ ЦНТ К-1250-6,9/25

Висновки

З використанням методів оптимального проектування створені проточні частини циліндрів високого, середнього та низького тисків. В ході чисельного експерименту при проектуванні проточних частин використовувались підходи з меншими трудовими, часовими та фінансовими витратами.

Проведено серію варіаційних розрахунків з використанням представленого методу та розроблена тривимірна модель облопачування ПЧ ЦВТ і ЦСТ турбіни К-1250-6,9/25.

Виконано оптимізацію проточної частини ЦНТ К-1250-6,9/25 та отримано розподіл ліній струму, описаних кубічними інтерполяційними сплайнами, які відповідають середнім лініям струминок течії ПЧ ЦНТ.

Список літератури

1. *International Energy Agency*. Worldenergyoutlook. 9 November, 2011. Режим доступу http://www.iea.org/weo/docs/weo2011/es_russian.pdf.
2. Закон про енергозбереження України. *Верховна рада України*. – Режим доступу <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр>.
3. Usatyi, O., Avdieieva, O., Maksuta, D., Tuan, P.: Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines. *AIP Conference Proceedings*. 2018. vol. 2047. no. 1. P. 020025. doi: 10.1063/1.5081658
4. Бойко А. В., Усатый А. П., Авдеева Е. П. Методология объектно-ориентированной комплексной оптимизации проточных частей мощных паровых турбин с учетом переменного режима работы. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2014. № 13(1056). С. 5–10. Бібліогр.: 10 назв. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).
5. Бойко А. В., Говорущенко Ю. Н. *Основы теории оптимального проектирования проточной части осевых турбин: учебн. [для студ. высш. учеб. завед.]*. Харьков: Выща школа, 1989. 217 с.
6. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. [и др.] *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. Москва: Наука, 1976. 400 с.
7. Бойко А. В., Гаркуша А. В. *Аэродинамика проточной части паровых и газовых турбин: расчёты, исследования,*

оптимизация, проектирование. Харьков: ХГПУ, 1999. 360 с.

8. Усатый А. П. Определение начальных приближений параметров проточной части осевой турбины в задачах оптимального синтеза и анализа. *Энергобережение, энергетика, энергоаудит*. Харьков, 2008. № 11. С. 14–20.

References (transliterated)

1. (2011), *International Energy Agency*. Worldenergyoutlook. 9 November, http://www.iea.org/weo/docs/weo2011/es_russian.pdf.
2. “Zakon pro enerhozberezhennia Ukrainy”, *Verkhovna rada Ukrainy*. <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр>.
3. Usatyi, O., Avdieieva, O., Maksuta, D., Tuan, P. (2018), “Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines”, *AIP Conference Proceedings*, vol. 2047, no. 1, p. 020025, doi: 10.1063/1.5081658
4. Boiko A. V., Usaty A. P., Avdieieva O. P. (2014), “Methodology of the Object-Oriented Complex Optimization of the Flow Passes of Powerful Steam Turbines Taking into Consideration the Variable Operation Mode”, *Bulletin of NTU “KhPI”*. Series: Power and heat engineering processes and equipment. no. 13(1056). P. 5–10. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).
5. Boyko A. V., Govorushchenko Yu. N. (1989), *Osnovy teorii optimalnogo proyektirovaniya protochnoy chasti osevykh turbin: uchebnyk* [Fundamentals of the Theory of Optimal Design of the Flow Path of Axial Turbines: Textbook. [For students of higher educational institutions], Vyscha shkola, Kharkov, 217 p. (in Russian).
6. Godunov S. K., Zabrodin A. V., Ivanov M. Ya. [et al.] (1976), *Chislennoye resheniye mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical Solution to Multidimensional Problems of Gas Dynamics], Nauka, Moscow, 400 p. (in Russian).
7. Boyko A. V., Garkusha A. V. (1999), *Aerodinamika protochnoy chasti parovykh i gazovykh turbin: raschyoty, issledovaniya, optimizatsiya, proyektirovaniye* [Aerodynamics of the Flow Path of Steam and Gas Turbines: Calculations, Research, Optimization, Design], Kharkiv National Pedagogical University, Kharkov, 360 p. (in Russian).
8. Usaty A. P. (2008), “Opredeleniye nachalnykh priblizheniy parametrov protochnoy chasti osevoy turbiny v zadachakh optimalnogo sinteza i analiza [Determination of Initial Approximations of the Parameters of the Flow Path of an Axial Turbine in the Problems of Optimal Synthesis and Analysis]”, *Energozberezheniye, energetika, энергоаудит*, no. 11, pp. 14–20 (in Russian).

Надійшла (received) 01.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пальков Ігор Андрійович (Пальков Игорь Андреевич, Palkov Ihor) – заступник головного конструктора парових турбін АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4639-6595>; e-mail: igor.palkov@i.ua.

Пальков Сергій Андрійович (Пальков Сергей Андреевич, Palkov Sergii) – начальник сектору конструкторського відділу АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2215-0689>; e-mail: sergpalkov@gmail.com.

Ищенко Олег Ігоревич (Ищенко Олег Игоревич, Ishchenko Oleh) – провідний конструктор конструкторського відділу АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; e-mail: oleg_ishchenko@i.ua.

Авдеева Олена Петрівна (Авдеева Елена Петровна, Avdieieva Olena) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; e-mail: Olena.Avdieieva@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9358-4265>.