

УДК 515.2

Д.В.Котляр

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## **ОСОБЛИВОСТІ АДАПТАЦІЇ ГЕОМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОХОЛОДЖУВАНИХ ЛОПАТОК ОСЬОВИХ ТУРБІН ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ЇХ У CAD/CAE/CAM СИСТЕМАХ**

*Розглядаються питання проектування та адаптації геометричних моделей охолоджуваних лопаткових апаратів осьових турбін з використанням сучасних комп'ютерних технологій з метою дослідження їх в програмних комплексах обчислювальної газодинаміки. Наводяться особливості та даються рекомендації щодо розробки геометричних моделей об'єктів дослідження лопаткових апаратів у програмному середовищі обчислювальної газодинаміки FlowVision.*

Ключові слова: *лопатка, осьова турбіна, геометричне моделювання, обчислювальна газодинаміка, проектування.*

**Постановка проблеми.** Автоматизоване проектування охолоджуваних лопаткових апаратів турбомашин є актуальним напрямком розвитку підприємств галузі у сучасному інформаційному світі. Але сьогодні на ряду з величезною кількістю розроблених програмних продуктів автоматизованого проектування геометричних моделей лопаткових апаратів не вистачає системного підходу і теоретичної бази для проектування та адаптації їх інформаційних даних до стандартів всесвітнього простору CAD/CAE/CAM систем.

За браком інформації про сучасні методи проектування та стандарти зберігання інформаційних даних геометричних моделей є необхідність висвітлення особливостей та принципів передачі цих даних від спеціалізованих програм автоматизованого проектування до поширених CAD/CAE/CAM систем з метою збереження та оперування розробленими геометричними моделями у форматах сучасних інформаційних стандартів для оформлення проектної документації та впровадження її у виробництво. На ряду з автоматизованим проектуванням також постає проблема оптимізації виробничих процесів підприємств галузі, яка безпосередньо пов'язана з проведенням експериментальних досліджень спроектованих комплексів, тому використання програмних продуктів обчислювальної газодинаміки, як засобів для проведення більш рентабельних віртуальних експериментів, є невід'ємною частиною комп'ютерних технологій для сучасного проектного та виробничого комплексу. Цей аспект спонукає до розв'язання питань, що постають при розробці та адаптації геометричних об'єктів аналізу під середовище систем обчислювальної газодинаміки, наприклад, несумісність платформ ядер геометричного моделювання та розробка геометрії об'єктів дослідження віртуального експерименту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасному інформаційному світі особлива увага приділяється дослідженням геометричних моделей за допомогою новітніх комп'ютерних технологій. Багато літературних джерел присвячено питанням розробки та аналізу робочих елементів турбомашин у CAD/CAE/CAM системах. Так, наприклад, у джерелах [1 – 5] викладені методи автоматизованого проектування охолоджуваних лопаток осьових турбомашин. У закордонних джерелах [6, 7] описуються дослідження геометричних моделей каналів внутрішнього охолодження та плівкового охолодження на вхідних кромках лопаток турбін з використанням програмного продукту обчислювальної газодинаміки ANSYS ICEM-CFD. Слід зазначити, що кількість літературних джерел вільного доступу у напрямку розробок геометричних моделей лопаткових апаратів та програмних алгоритмів зберігання їх інформаційних даних вкрай обмежена, тому проблема адаптації інформаційних даних розроблених геометричних моделей до всесвітньо прийнятих стандартів, якими оперують сучасні CAD/CAE/CAM системи, є досить вагомою та потребує окремої уваги.

**Формування цілей статті.** Висвітлити принципи автоматизованого проектування геометричних моделей охолоджуваних лопаток осьових турбін та адаптації їх до інформаційного середовища CAD/CAE/CAM систем. Зазначити особливості переходу між стандартами збереження інформаційних даних геометричних моделей та навести рекомендації щодо якісного перенесення

геометричних моделей між окремими інформаційними середовищами, що мають різні платформи ядер геометричного моделювання.

**Основна частина.** Створення зовнішньої форми лопатки чи системи її внутрішнього охолодження передбачає, перш за все, формування поверхонь, що обмежують у інформаційному просторі майбутню геометричну модель лопатки, що проектується. Ці поверхні повинні максимально точно відповідати проектним вимогам з точки зору критеріїв кривини, цілісності та диференційної відповідності у стикових кромках поверхневих фрагментів. Кожен фрагмент поверхні, що утворюють модель, створюється відповідно розробленого алгоритму побудови, що враховує принципи властивості майбутньої деталі. Так, наприклад, вхідна та вихідна кромки лопатки повинні відповідати кутам входу та виходу міжлопаткової течії в проточній частині турбіни, мати еліптичну або колову форму, тобто в поперечних перерізах її твірними повинні бути криві другого порядку, а поверхні обводів лопатки мають відповідати кутам установки та заданій товщині профілю у характерному перерізі і т.д.

Передбачається формування геометричної моделі охолоджуваної лопатки дефлекторного типу, що має каналову систему охолодження матриці стержня дефлектору. Така схема охолодження передбачає, що сама конструкція лопатки буде складатися з таких геометричних елементів як зовнішня оболонка дефлектору та матриця охолодження.

Модель оболонки дефлектора описується двома поверхнями: зовнішньою та внутрішньою. Для побудови геометричної моделі зовнішньої поверхні оболонки, що задіяна у газодинамічних процесах роботи турбіни, пропонується використовувати методи, що описуються у джерелах [1, 2]. Так, у роботі [1] описується аналітична модель та алгоритм побудови поверхневих обводів спинки та коритця лопатки, а в роботі [2] – формування поверхонь вхідної та вихідної кромки. У свою чергу, в основу цих методів були покладені принципи побудови геометричних моделей плоских профілів в характерних перерізах лопатки, які докладно викладені у джерелі [3]. Внутрішня ж поверхня, що омивається охолоджуючим агентом (стиснутим повітрям) формується як еквідистантна поверхня по відношенню до побудованої зовнішньої, згідно визначеної у проекті товщини оболонки. Більш докладно метод побудови внутрішньої поверхні оболонки наведений у джерелі [5].

Формування моделі матриці охолодження передбачає створення поверхонь зовнішньої форми дефлектора (матриці) та поверхонь системи каналів його охолодження. Зовнішня форма поверхні дефлектора будується на базі метода, за яким формується внутрішня поверхня оболонки дефлектора [5], згідно величини зазору охолоджуючої щілини між оболонкою та матрицею охолодження, що також визначається проектним розрахунком лопатки. Поверхні каналів охолодження, кількість яких може бути встановлена відповідно до характеристик міцності та ефективності охолодження, утворюються на базі розробленого метода, математична модель та алгоритм якого подані у джерелі [6]. Змодельовавши характеристичні поверхні охолоджуваної лопатки з використанням розробленого пакету програм, створеного на базі вище запропонованих методів проектування, на рис. 1, *а* представлено утворену поверхнями геометричну модель охолоджуваної лопатки, яка візуалізована в інформаційному просторі AutoCAD. Для перетворення моделі утвореної поверхнями лопатки на твердотілу модель лопаткового апарату існує декілька напрямів. У першому пропонується використовувати програмні алгоритми створення інформаційних об'єктів у форматі збереження даних стандарту IGES, як найпоширенішого формату обміну графічними даними серед CAD/CAE/CAM систем. Другий напрям передбачає формування тривимірної моделі у середовищі AutoCAD по криволінійних елементах плоских перерізів сформованих поверхонь лопатки, з використанням інструментів проектування LOFT та SUBTRACT. Криволінійні елементи в назначених перерізах будуються автоматично за допомогою завантаження *script*-файлів у інформаційний простір AutoCAD. *Script*-файли формуються у розробленому автором програмному пакеті геометричного моделювання охолоджуваної лопатки згідно накладених на неї проектних вимог. Геометрична модель твердотілої лопатки з ефектом прозорості у середовищі Autodesk AutoCAD зображена на рис. 1, *б*.

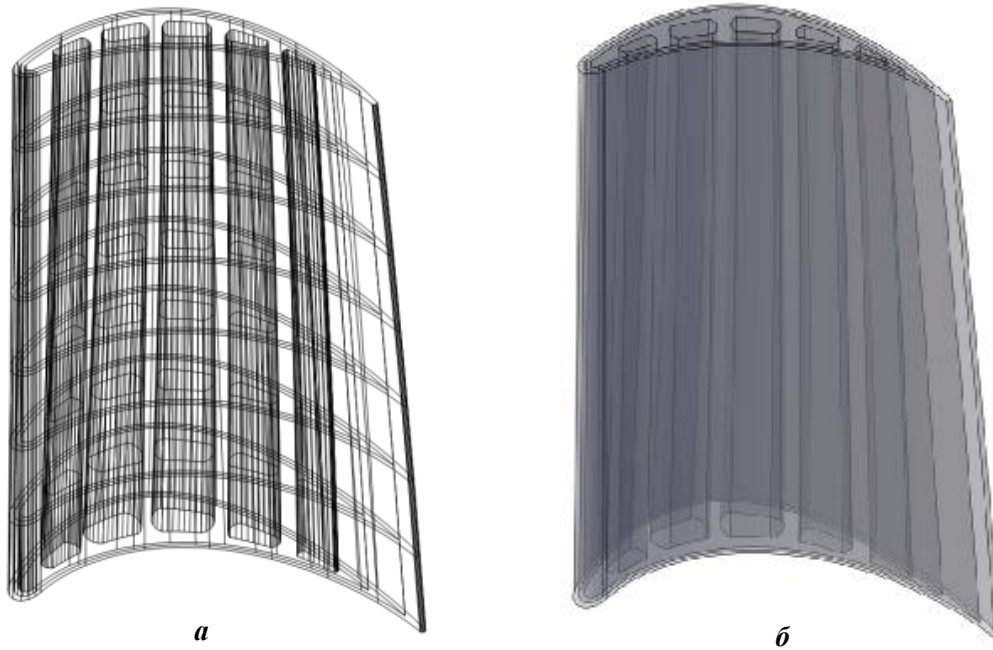


Рис. 1. Представлення геометричної моделі охолоджуваної лопатки:  
*а* – зображення поверхонь; *б* – твердотіла модель.

З урахуванням того, що AutoCAD відноситься до CAD систем легкого рівня, призначеного для двовимірного проектування та випуску проектної документації, то для виконання подальшого комплексного тривимірного проектування лопаткового апарату турбіни необхідно перейти до інформаційного середовища CAD/CAE/CAM систем тривимірного рівня, таких як, наприклад, CATIA, Solid Works, Autodesk Inventor, КОМПАС-3D. Для переносу інформаційної моделі лопатки з AutoCAD до CAD/CAE/CAM систем рекомендовано використовувати стандарт ACIS, що має файлове розширення \*.sat. У якості вибору CAD/CAE системи рекомендується використовувати Autodesk Inventor, що обґрунтовано з точки зору найменшої втрати якості геометричних елементів, яка характеризується точністю переносу інформаційних даних, за рахунок використання єдиних стандартів експорту та імпорту інформаційних моделей в межах єдиної платформи ядра геометричного моделювання Autodesk.

При необхідності подальшого проектування в CAD/CAE/CAM системах виробництва CATIA, до якої належить і програмний продукт Solid Works, рекомендується використовувати у якості альтернативного формату стандарт експорту Parasolid, з файловим розширенням \*.x\_t або \*.x\_b. При переході між різними платформами ядер геометричного моделювання, щоб уникнути несумісності стандартів експорту і імпорту моделей, особливу увагу необхідно приділяти версіям суміжних CAD/CAE/CAM систем, за звичай, використовують критерій року розробки версії програмного продукту.

Досить важливу роль відіграють інформаційні моделі геометричних елементів не лише для залучення автоматизованих технологій у виробництво, а й для проведення віртуальних експериментів, які значно економлять проектні та виробничі витрати на підприємствах галузі. На сучасному рівні розвитку наукового прогресу наукові розробки надають можливість проводити віртуальні експерименти за напрямками аналізу термо-газодинамічних показників, характеристик міцності елементів, взаємних зв'язків між вузлами механізмів. При проектуванні лопаткових апаратів турбомашин досить жорстко постає проблема термічного та газодинамічного аналізу лопаток, тому підготовка геометричної моделі для адаптації її до середовища програмних продуктів обчислювальної газодинаміки (CFD) є також важливим аспектом проектування. Вимоги до інформаційної моделі у кожного окремого програмного забезпечення CFD різні, але всі вони направлені на утворення геометричної моделі об'єктів дослідження: робочого елемента, потоку, акустичного простору тощо.

У якості прикладу розглянемо адаптацію геометричної моделі поперечного фрагменту охолоджуваної лопатки в інформаційний простір програмного продукту FlowVision, розробленого

російською компанією TESIS. Перед створенням геометричної моделі елементів дослідження необхідно визначити, які об'єкти підлягають термо-газодинамічному аналізу. В роботі розробляється геометрична модель для аналізу газодинамічних характеристик зовнішньої оболонки дефлектора, теплопровідності і теплопереносу між елементами охолодження та охолоджуючим агентом. Тобто геометрична модель розрахункової сітки повинна складатися з міжлопаткового каналу, тіла оболонки дефлектора, охолоджуючого потоку в зазорі між оболонкою та дефлектором, тіла дефлектора і, окремо, потоків в каналах охолодження дефлектора. У середовищі Solid Works згідно з умовами набігання потоку у лопатковий апарат та кроку міжлопаткового каналу, які визначаються проектними розрахунками, було розроблено розрахункову геометричну модель елементів віртуального аналізу, що представлена на рис 2. На цьому рисунку зображено геометричну модель, підготовлену для експортування та адаптації її у середовище FlowVision з метою проведення віртуального аналізу.

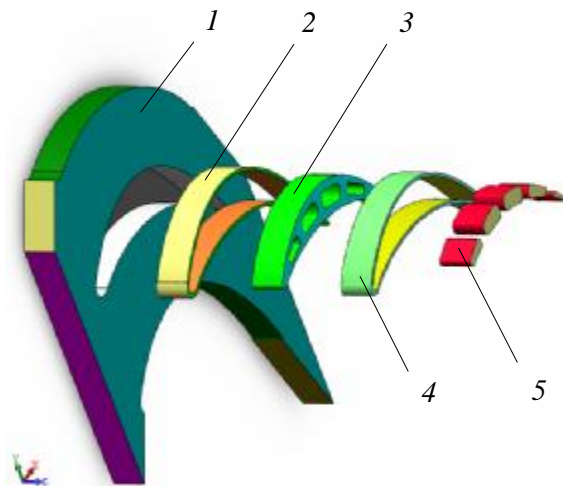


Рис 2. Геометрична модель об'єктів віртуального аналізу:

1 – міжлопатковий канал; 2 – оболонка дефлектору; 3 – дефлектор;  
4 – канал охолодження оболонки дефлектору; 5 – канали охолодження дефлектору

Програмний продукт FlowVision оперує двома форматами зберігання інформаційних даних STL та VRML, відповідно, з файловим розширеннями \*.stl та \*.wrl. Перший формат забезпечує досить високу якість переносу даних, але є небезпека отримання геометрії з поєднаними гранями у випадку їх відносного розміщення під невеликими кутами, що може унеможливити призначення їм різних граничних умов. Точність другого формату залежить від можливостей графічного адаптеру, що на слабких ПК може забезпечити низьку точність передачі геометрії за рахунок заміни криволінійних сегментів лінійними. Формат VRML дозволяє розбивати суміжні криволінійні грані на окремі поверхні шляхом зафарбовування їх у різні кольори. Зафарбовування окремих суміжних поверхонь в однаковий колір призводить до розпізнавання їх середовищем FlowVision як однієї поверхні.

Граничні умови назначаються згідно проектних даних термогазодинамічного розрахунку ступеня турбіни. Розрахункова сітка будується в залежності від необхідної точності розрахунку та апаратних можливостей ПК. Перед початком розрахунку, керуючись часом проходження міжлопаткового простору потоком і часом прогрівання металевих елементів, який залежить від їх теплоємності, необхідно встановити час ітераційного кроку. Необґрунтований вибір часового ітераційного кроку може призвести до збільшення апаратного часу або розходження процесу розрахунку. Результати розрахунку зображено на рис. 3.

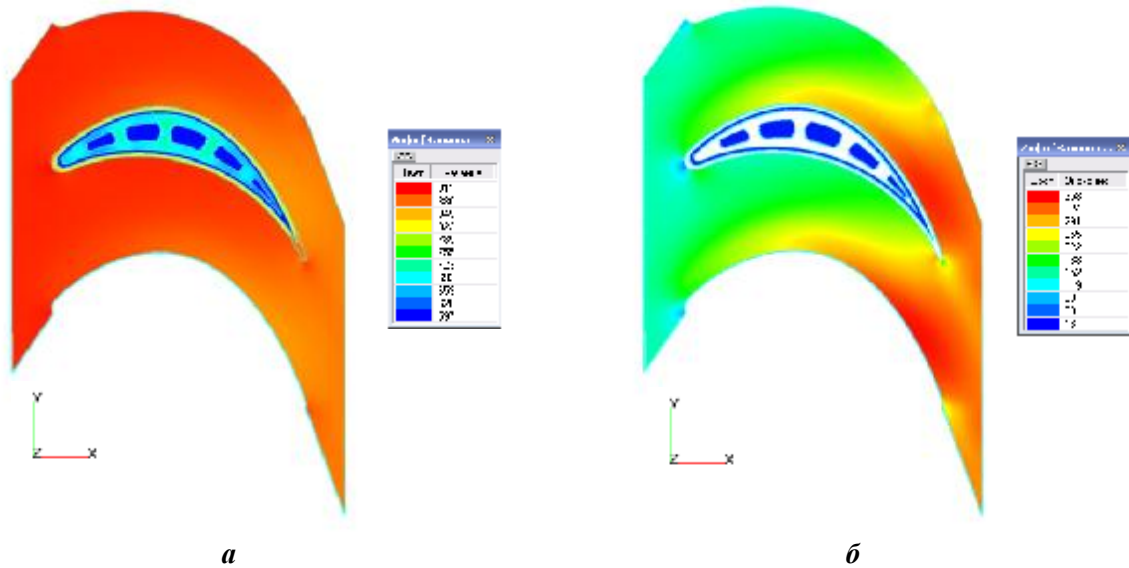


Рис. 3. Візуалізація результатів віртуального аналізу лопаткового апарату:  
а – термодинамічні; б – газодинамічні показники

**Висновки.** Викладені принципи автоматизованого проектування та адаптації геометричних моделей до інформаційного середовища CAD/CAE/CAM систем практично підтвердили можливість впровадження розроблених методів геометричного моделювання охолоджуваних лопаток осьових турбін на підприємствах галузі. Наведені рекомендації до застосування комп'ютерних технологій в процесі розробок і дослідження робочих елементів турбіни дають змогу більш свідомо опанувати технологічні засади оперування CAD/CAE/CAM системами та пакетами програм обчислювальної газодинаміки.

1. Борисенко В.Д. Геометричне моделювання поверхонь спинки і коритця лопаток осьових турбін / В.Д. Борисенко, Д.В. Котляр // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2010. – №6 (435). – С. 90–95.
2. Борисенко В.Д. Геометричне моделювання поверхонь еліптичних кромek лопаток осьових турбін / В.Д. Борисенко, Д.В. Котляр // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Мелітополь: Праці ТДАТУ, 2011. – Вип. 4. – Том 49. – С. 17–22.
3. Борисенко В.Д. Деякі аспекти побудови обводів потовщених профілів лопаток осьових турбін / В.Д. Борисенко, Д.В. Котляр // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон: ХНТУ, 2011. – Вып. 3(42). – С. 109–114.
4. Борисенко В.Д. Геометричне моделювання оболонки дефлектора охолоджуваних лопаток осьових турбін / В.Д. Борисенко, Д.В. Котляр, І.В. Устенко // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Прикладна геометрія та інженерна графіка". Випуск 87. Відповідальний редактор В.Є. Михайленко. – К.: КНУБА, 2011 р. – С. 84–89.
5. Борисенко В.Д. Геометричне моделювання каналів системи охолодження лопаток осьових турбін / В.Д. Борисенко, Устенко І.В., Д.В. Котляр // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Прикладна геометрія та інженерна графіка". Випуск 88. Відповідальний редактор В.Є. Михайленко. – К.: КНУБА, 2011 р. – С. 88–93.
6. Islami S.B. Computational investigation of film cooling from trencned 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.
7. Iacovides H. Internal blade cooling: Cinderella of computational and experimental fluid dynamics research in gas turbines / H. Iacovides, B.E. Launder // IMechE Vol. 221 Part A: J. Power and Energy. – UK. Manchester: 2007, P. 265–290.