

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ТА ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ РОТОРІВ У ЛУНКОВИХ УЩІЛЬНЕННЯХ ВІДЦЕНТРОВИХ МАШИН

Сучасні відцентрові машини, включаючи компресори, турбіни й насоси, функціонують у жорстких умовах високих температур, тиску та частот обертання. Герметизація простору між ротором і статором є критично важливою як для енергоефективності, так і для довговічності агрегатів. Особливу роль у цьому відіграють безконтактні лункові ущільнення, які завдяки своїй конфігурації генерують інтенсивні турбулентні структури, що знижує витрати робочого середовища через зазори. Проте експлуатаційні навантаження призводять до деформацій ущільнювальних елементів, що змінює структуру потоку, розподіл тиску та викликає негативні впливи на ротородинамічну поведінку.

Деформації ущільнювальних кілець і зубців виникають внаслідок термічного розширення, відцентрових сил та механічного зносу. Нерівномірні зазори (наприклад, у вигляді конічної або параболическої деформації) змінюють локальну швидкість і турбулентність потоку, що погіршує ефективність ущільнення. У таких випадках ускладнюється формування зон рециркуляції, що призводить до збільшення витрат [1, 2]. З точки зору роторної динаміки, наявність деформацій ущільнення змінює гідродинамічні сили в зазорі, що впливає на коливальну поведінку ротора. У ряді досліджень було показано, що навіть незначна зміна розподілу тиску в ущільненні здатна викликати зсув резонансних частот [3].

Форма лунок, профіль зубців та параметри перегородок безпосередньо впливають на витратну ефективність. Ступінчасті та стільникові структури формують складні турбулентні зони та збільшують втрату енергії потоку [2, 4]. Розглянуте у роботі [5] ступінчасте лабіринтне ущільнення, яке порівнювалося із лабіринтним

ущільненням класичної прямої форми (висота зуба, ширина зуба та величина зазору залишалися незмінними для обох варіантів) показало на 17,9% кращу здатність зменшувати витoki робочого середовища, ніж класичне пряме ущільнення. Це було встановлено на основі тривимірного моделювання методами обчислювальної гідродинаміки (CFD – computational fluid dynamic). Проте Кванка [6] виявив, що ступінчасте лабіринтне ущільнення має гірші ротородинамічні характеристики, ніж пряме ущільнення. Пізніше Кванка [7] використав процедуру ротородинамічного аналізу для тестування різних методів покращення стійкості ущільнень. Вихрові гальма на вході в ущільнення показали свою високу ефективність, тоді як використання стільникового типу структури створювало більше силове збудження роторної системи. Також ефективним рішенням є застосування додаткових стінок (ребер), які формують додаткові турбулентні та рециркуляційні зони і знижують витoki робочого середовища, тобто підвищують загальну герметичність системи. Лабіринтне ущільнення з додатковими ребрами показало значно менший показник коефіцієнту потоку. Зменшення становило від 21,5% до 42,6% у порівнянні з традиційним лабіринтним ущільненням [2].

Сучасні підходи при розрахункових дослідженнях ущільнень базуються на поєднанні CFD-аналізу для течії і скінченно-елементного аналізу FEA (finite element analysis) для врахування деформацій. Взаємозв'язок таких підходів дозволяє враховувати складні умови роботи ущільнень, включаючи змінення тиску, температури, та геометрії зазору. Моделі, які ґрунтуються на аналізі взаємодії між рідкою і твердою структурами FSI (fluid-structure interaction) надають змогу прогнозувати поведінку ущільнення з урахуванням пружних і теплових деформацій. Це надзвичайно важливо для високошвидкісних роторів, де динаміка течії тісно пов'язана з жорсткістю конструкції.

Отже, треба зазначити, що деформація ущільнювальних елементів має критичний вплив на герметичність і ротородинамічну стійкість. Застосування числового моделювання (CFD+FEA) дозволяє детально дослідити вплив геометрії та умов експлуатації на ефективність ущільнень. А оптимізація конструкцій лункових ущільнень – перспективний напрямок підвищення герметичності та динамічної стійкості відцентрових машин. При цьому, системний підхід до вибору

конфігурацій ущільнень дозволяє зменшити енергетичні втрати, підвищити ККД відцентрових машин і знизити ризики нестійкості роторів.

Список використаних джерел

1. Nonuniform Clearance Effects on Pressure Distribution and Leakage Flow in the Straight-through Labyrinth Seals / Y. Shi et al. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2022. Vol. 2022. P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/9684007>.

2. A Study on the Leakage Characteristics of a Stepped Labyrinth Seal with a Ribbed Casing / Hur M.-S., Moon S.-W., Kim T.-S. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 13. P. 3719. URL: <https://doi.org/10.3390/en14133719>.

3. The effect of clearance variation on the aeroelastic stability of labyrinth seal / Y. Zheng et al. *Physics of Fluids*. 2025. Vol. 37, № 1. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0246411>.

4. Mass Flow Function Correlation for Solid and Honeycomb Land Labyrinth Seals including Fin Front Angle, Clearance, Fin Number and Honeycomb Geometry / H. J. Kim et al. *Machines*. 2023. Vol. 11, № 9. P. 880. URL: <https://doi.org/10.3390/machines11090880>.

5. Optimizing the Geometric Parameters of a Stepped Labyrinth Seal to Minimize the Discharge Coefficient. / Chun Y.H., Ahn J. *Processes*. 2022. Vol. 10, № 10. P. 2019. URL: <https://doi.org/10.3390/pr10102019>.

6. Dynamic Coefficients of Stepped Labyrinth Gas Seals. / Kwanka K. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2000. Vol. 122, № 3. P. 473–477. URL: <https://doi.org/10.1115/1.1287033>.

7. Improving the stability of labyrinth gas seals. / Kwanka K. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2001. Vol. 123, № 2. P. 383–387. URL: <https://doi.org/10.1115/1.1359772>