

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕМПФЕРНОГО ЛАБИРИНТНОГО УПЛОТНЕНИЯ С ОКРУЖНЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

Цзинь Юйцин^{1,2}, Фалалеев С.В.¹

¹Самарский университет, г. Самара, yuqing124@gmail.com

²Северо-Западный политехнический университет, г. Сиань (КНР)

Ключевые слова: лабиринтное уплотнение, окружная перегородка, аэродинамические силы, эквивалентная жёсткость, перекрёстная жёсткость, численное моделирование

Лабиринтное уплотнение является наиболее распространённым типом бесконтактных уплотнений авиационных газотурбинных двигателей. При высокоскоростном вращении ротора газ в межзубцовых камерах вовлекается в интенсивное окружное движение, порождая перекрёстные жёсткостные силы, способные вызвать субсинхронную прецессию ротора [1, 2]. Для подавления окружного потока предложена конструкция SDS (Scallop Damper Seal), в которой канавки на корпусе прерывают закрутку и снижают перекрёстную жёсткость [3, 4]. Однако выполнение канавок ослабляет конструктивную целостность корпуса, что ограничивает применимость SDS в ступенях высокого давления [5].

В настоящей работе предложена установка окружных перегородок в межзубцовых камерах лабиринтного уплотнения. Перегородки размещаются внутри камер без изменения геометрии корпуса, обеспечивая прерывание окружного потока при сохранении конструктивной целостности. Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS CFX на полной 360°-модели трёхгребневого уплотнения.

Объектом исследования является трёхгребневое лабиринтное уплотнение прямого типа (радиус ротора $R = 22,6$ мм, радиальный зазор $Cr = 0,4$ мм). В межзубцовых камерах установлены окружные перегородки по 8 шт. на камеру ($\theta = 45^\circ$). Рассмотрены пять конфигураций: без перегородок (базовый вариант); одна группа перегородок при $\delta = 0,5$ и $1,0$ мм; две группы перегородок при $\delta = 0,5$ и $1,0$ мм. Трёхмерная модель представлена на рис. 1.

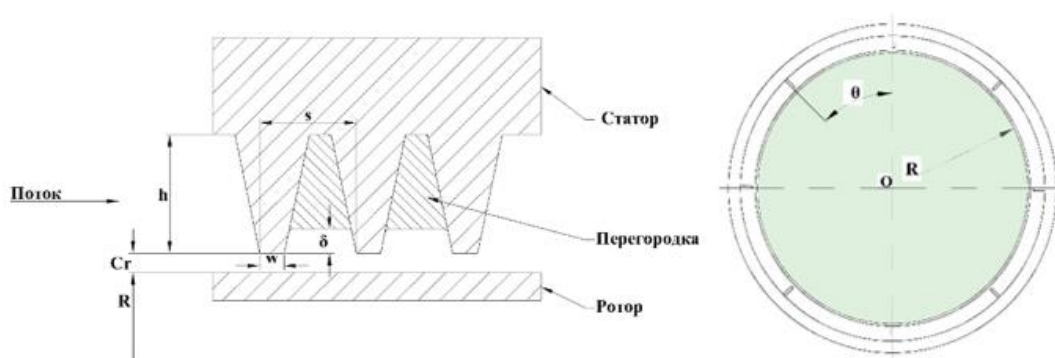


Рис. 1 – Геометрия уплотнения и размерная схема

Решались стационарные уравнения RANS с моделью турбулентности SST k- ω [6]. Рабочее тело – идеальный газ (воздух). На входе задано полное давление, на выходе – статическое давление 0,3 атм; перепад давления $\Delta P = 0,2\text{--}1,5$ атм. Стенка ротора задана как вращающаяся поверхность (36 660 об/мин). Эксцентриситет ротора $e = 0; 0,1; 0,2$ мм. Верификация выполнена по данным [7]: отклонение расчётного значения аэродинамической силы от экспериментального составило 6,6 %. Сеточная независимость подтверждена (отклонение 0,16 %).

Окружная скорость на выходе для всех конфигураций составляет 82,2–82,4 м/с (коэффициент закрутки $\approx 0,95$), отклонение от базового варианта не превышает $\pm 0,15$ %. Расход утечки $\approx 0,0246$ кг/с, отклонение $< 0,4$ %. Таким образом, перегородки не оказывают значимого влияния на общую закрутку потока и герметичность уплотнения.

На рис. 2 представлена зависимость эквивалентных коэффициентов жёсткости от перепада давления при $e = 0,2$ мм. Прямая жёсткость K_d для всех конфигураций с перегородками существенно превышает базовый вариант; все значения положительны. Механизм увеличения K_d связан с перераспределением давления в камерах: перегородки препятствуют окружному перетoku газа, сохраняя перепад давления между сторонами минимального и максимального зазоров, усиливая эффект Ломакина [8].

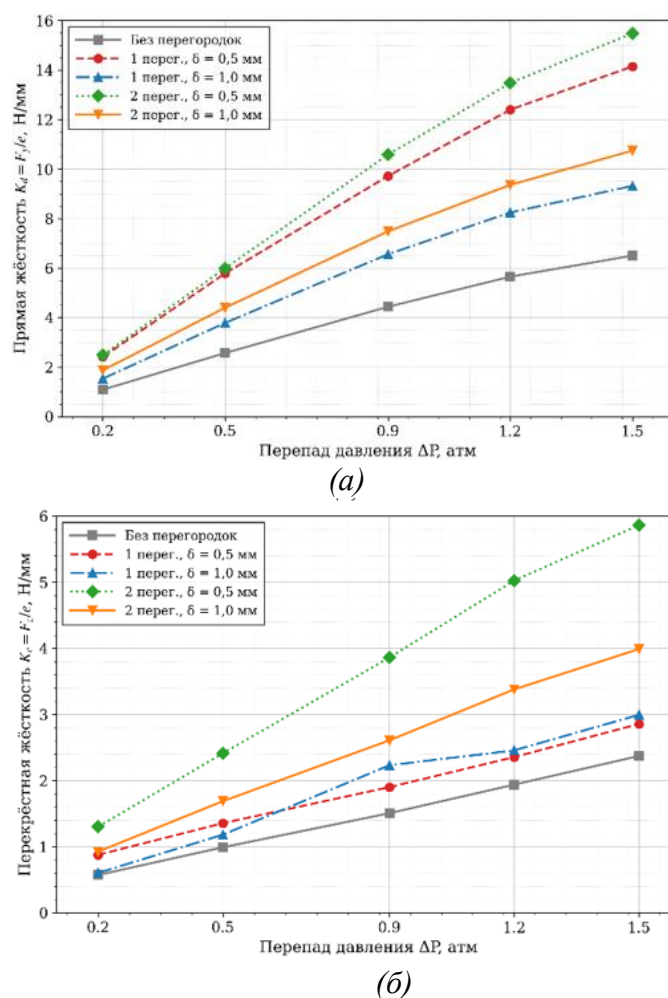


Рис. 2 – Зависимость K_d и K_s от перепада давления при $e = 0,2$ мм:
(а) прямая жёсткость K_d ; (б) поперечная жёсткость K_s

Поперечная жёсткость K_s для конфигураций с одной группой перегородок незначительно отличается от базового варианта, тогда как при двух группах K_s возрастает примерно в 2,5 раза. Конфигурация с одной группой перегородок при $\delta = 0,5$ мм обеспечивает максимальное отношение F_y/F_z , что соответствует наилучшей комплексной устойчивости: прирост K_d значительно превышает прирост K_s .

Предложенная конструкция и SDS представляют два различных подхода к улучшению характеристик уплотнения. SDS подавляет окружной импульс за счёт канавок, снижая K_s , однако K_d при этом часто принимает отрицательные значения [4]. Перегородки усиливают K_d за счёт перераспределения давления, не изменяя закрутку потока; геометрия корпуса сохраняется. Оба подхода являются взаимодополняющими по механизму действия.

Таким образом, установка окружных перегородок в межзубцовых камерах лабиринтного уплотнения позволяет существенно увеличить прямую жёсткость при незначительном изменении поперечной жёсткости и расхода утечки. Конфигурация с одной группой перегородок при $\delta = 0,5$ мм является оптимальной в рассмотренном диапазоне параметров. Результаты получены на основе модели статического эксцентриситета; частотнозависимые динамические коэффициенты требуют дальнейшего исследования.

Список литературы

1. Black, H.F. Effects of hydraulic forces in annular pressure seals on the vibrations of centrifugal pump rotors / H.F. Black // Journal of Mechanical Engineering Science. – 1969. – Vol. 11(2). – P. 206–213.
2. Hua, J. Numerical analysis of nonlinear rotor-seal system / J. Hua, S. Swadiduwhipong, Z.S. Liu [et al.] // Journal of Sound and Vibration. – 2005. – Vol. 283(3–5). – P. 525–542.
3. Zahorulko, A.V. Computational analysis for scallop seals with sickle grooves. Part I: Leakage performance / A.V. Zahorulko, Y.B. Lee // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 147. – P. 107153.
4. Yao, M. Sensitivity analysis of scallop damper seal design parameters for leakage and static performance / M. Yao, W. Zhang, Q. Zhao [et al.] // Aerospace. – 2024. – Vol. 11(12). – P. 1052.
5. Li, Z. Numerical investigation on the leakage and static stability characteristics of pocket damper seals at high eccentricity ratios / Z. Li, J. Li, Z. Feng // Proc. ASME Turbo Expo 2017. – GT2017-63562.
6. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / F.R. Menter // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32(8). – P. 1598–1605.
7. Zhang, W. Improving the rotordynamic stability of short labyrinth seals using positive preswirl / W. Zhang, Q. Gu, H. Cao [et al.] // Journal of Vibroengineering. – 2020. – Vol. 22(6). – P. 1295–1308.
8. Lomakin, A.A. Calculating of critical speed and securing of dynamic stability of high-pressure pumps with reference to forces arising in seal gaps / A.A. Lomakin // Energomashinostroyeniye. – 1958. – Vol. 4. – P. 1158–1162.

Сведения об авторах

Цзинь Юйцин – магистрант Института двигателей и энергетических установок Самарского университета. Область научных интересов: уплотнения газотурбинных двигателей, вычислительная газовая динамика.

Фалалеев Сергей Викторович – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского университета. Область научных интересов: моделирование сопряженных процессов, уплотнения авиационных двигателей.

STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF A DAMPER LABYRINTH SEAL WITH CIRCUMFERENTIAL PARTITIONS

Jin Yuqing^{1,2}, Falaleev S.V.¹

¹Samara University, Samara, Russia, yuqingJ124@gmail.com

²Northwestern Polytechnical University (NPU)

Keywords: *labyrinth seal, circumferential baffle, aerodynamic forces, equivalent stiffness, cross-coupled stiffness, CFD*

The effect of circumferential baffles in inter-tooth cavities of a labyrinth seal on aerodynamic forces and stiffness is studied. Full 360° CFD simulations (ANSYS CFX, SST k- ω) were performed for five configurations. Baffles increase direct stiffness via pressure redistribution while swirl and leakage remain unchanged. One baffle group at $\delta = 0.5$ mm gives the best stability.