

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА РАСЧЁТНОЙ СЕТКИ И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ЛАБИРИНТНОГО УПЛОТНЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Андросович И.В.<sup>1</sup>, Силуянова М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт, <sup>2</sup>ПАО «Компания “Сухой”»,  
г. Москва, irishapd-35@mail.ru

*Ключевые слова:* лабиринтные уплотнения, математическое моделирование, вычислительная газовая динамика, ГТД, оптимизация.

Одним из путей повышения эффективности газотурбинного двигателя является улучшение герметичности его газоздушных полостей и сокращение утечек воздуха за счёт применения новых, малорасходных уплотнений [1-5].

В работе решены следующие задачи: проведено исследование на сеточную сходимость; определены параметры расчётной сетки; определено влияние граничных условий на устойчивость расчета и точность результатов математического моделирования; осуществлен анализ отклика в широком диапазоне геометрических параметров уплотнения; установлены оптимальные геометрические параметры уплотнения; проведено сравнение расходных характеристик исходного и оптимального уплотнения [6-9]. Выбрана обобщенная конфигурация и непрерывные геометрические параметры уплотнения.

Для расчета выбрана многозонная сетка с типом *hexa dominant* и призматическим подслоем. В ходе серии расчетов была проведена оценка влияния размеров элементов сетки и конфигурации призматического подслоя на результаты расчетов. Результат анализа показал, сходимость достигается при использовании сетки с размером элементов менее 60 мкм, которая обеспечивала 4 элемента в канале в дополнение к призматическому подслою. Анализ показал значительное влияние использования функции стенки на результат расчета, что потребовало достижения  $y^+ \approx 1$  при высоте первого элемента 1 мкм и 20 слоями, что позволяет иметь коэффициент роста до размера основных элементов менее 1,25 [10-11].

Для экономии вычислительных ресурсов вычисляется сектор уплотнения. Результаты сравнивались с сектором 10 и 30 градусов и не показали существенных различий. Для уплотнения без учета окружной скорости было выполнено сравнение результатов при использовании граничных условий вращающейся периодики и условия стенки с проскальзыванием, различия в результатах составили менее 2%. При перестроении геометрии условие вращающейся периодики показало 3% неудавшихся расчетов, условие стенки с проскальзыванием – 0,1% неудавшихся расчетов. Был проведен анализ влияния окружной скорости на работу лабиринтного уплотнения, – влияние составило 1,1% [8,12].

Была построена поверхность отклика для лабиринтного уплотнения в зависимости от геометрических параметров. На основании проведенных расчетов получено оптимизированное лабиринтное уплотнение, проведен сравнительный анализ характеристик исходного и оптимизированного уплотнений.

Анализ сходимости сетки и влияния сетки показал, что при моделировании работы лабиринтного уплотнения необходимо использовать сетку, которая не допускает использования логарифмической функции стенки и обеспечивает значения  $y^+ \approx 1$ , а также имеет достаточное количество элементов в зазоре. Выполнен анализ влияния граничных условий на устойчивость и точность расчета. Оптимизация лабиринтного уплотнения позволила значительно снизить расход через него. Сравнение характеристик исходного и оптимизированного уплотнений показало, что оптимизированное уплотнение обеспечивает меньший массовый расход в широком диапазоне перепадов давлений. Оптимизация лабиринтного уплотнения позволяет снизить утечки воздуха до 50% в зависимости от величины зазора.

## Список литературы

1. Tong S K and Kyu S C 2009 Comparative analysis of the influence of labyrinth seal configuration on leakage behaviour. *J. Mech. Sci. Technol.* 23 2830 <https://doi.org/10.1007/s12206-009-0733-5>.
2. Morrison G and Chi D 1985 Incompressible flow in stepped labyrinth seals. *ASME/ACSE Applied Mechanics, Bioengineering and Fluids Engineering Conf.* (June 24-26, Albuquerque, New Mexico) ASME Paper-85-FE-4.
3. Schram V, Willenborg K, Kim S and Wittig S 2002 Influence of a honeycom facing on the flow through a stepped labyrinth seal. *J. Eng. Gas Turb. Power* 124 140 ASME-Paper 2000-GT-291.
4. Bidkar R, Edip S, Jifeng W, Azam T, Andrew M, Maxwell P, Grant M, Timothy A and Jeffrey M. 2016 Low-leakage shaft-end seals for utility-scale supercritical CO<sub>2</sub> turboexpanders. *J. Eng. Gas Turb. Power* 139 022503 <https://doi.org/10.1115/1.4034258>
5. Soemarwoto B, Kok J C, Cock K M J, Kloosterman A B and Kool G A 2007 Performance evaluation of gas turbine labyrinth seals using computational fluid dynamics. *Proc. GT2007 ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air* (14-17 May, Montreal, Canada:) p 1553
6. Wang W, Liu, Y, Jiang P and Chen H 2007 Numerical analysis of leakage flow through two labyrinth seals. *J. Hydrodyn.* 19(1) 107 [https://doi.org/10.1016/s1001\\_6058\(07\)60035-3](https://doi.org/10.1016/s1001_6058(07)60035-3)
7. Vakili A D, Meganathan A J, Michaud M A and Radhakrishnan S 2005 An experimental and numerical study of labyrinth seal flow. *Proc. GT2005-68224 ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea and Air* (June 6-9, Reno-Tahoe, Nevada, USA) p 1347
8. Vakili A D, Meganathan A J, Ayyalasomayajula S and Stephen H 2006 Advanced labyrinth seals for steam turbine generators. *Proc. Of GT2006 ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air* (May 8-11, Barcelona, Spain) p 1599
9. Zhigang L, Jun L and Zhenping F 2016 Labyrinth seal rotordynamic characteristics part i: geometrical parameter effects. *Journal of Propulsal and Power* 32(5) 1 <https://doi.org/10.2514/1.B35817>
10. Tyacke J C, Dai Y, Watson R and Tucker P G 2021 Design optimisation of labyrinth seals using LES. *Math. Model. Nat. Pheno.* 16 1 <https://doi.org/10.1051/mmnp/2020056>
11. Androsovich I V and Siluyanova M V 2021 Optimization of labyrinth seals in gas turbine engines. *Russian Engineering Research* 41(4) 360 <https://doi.org/10.3103/S1068798X21040043>

## Сведения об авторах

Андросович Ирина Вячеславовна, аспирант. Область научных интересов: рабочий процесс авиационных двигателей.

Силуянова Марина Владимировна: д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры ТПЭДЛА. Область научных интересов: комплексные исследования силовых установок ГТД.

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE QUALITY OF THE CALCULATED GRID AND BOUNDARY CONDITIONS ON THE RESULTS OF MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF THE LABYRINTH SEAL OF A GAS TURBINE ENGINE

Androsovich I.V.<sup>1</sup>, Siluyanova M.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute, <sup>2</sup>Company “Sukhoi”, Moscow, Russian Federation, [irishapd-35@mail.ru](mailto:irishapd-35@mail.ru)

*Keywords: labyrinth seals, mathematical modeling, computational gas dynamics, gas turbine engine. response surface, optimization.*

The work is devoted to the need to improve the turbomachines of aircraft in order to increase their efficiency by optimizing the characteristics of labyrinth seals to reduce the air leakages.