

УДК 621.515

Определение аэродинамических циркуляционных сил в воздушных лабиринтных уплотнениях

Брыкин Б. В., Леонтьев М. К.

Аннотация

В статье приведены результаты работы по исследованию течения газа в лабиринтных уплотнениях и определению значения аэродинамической силы при движении ротора на стационарном режиме в условиях круговой прецессии. Газодинамические расчеты проводились в программном комплексе ANSYS-CFX. Рассматривались модели лабиринтного уплотнения с равномерным зазором по окружности и модели, имитирующие эксцентриситет. Получены картины течения газа, определены аэродинамические циркуляционные силы для различных эксцентриситетов. Разработана методика моделирования течений в лабиринтных уплотнениях сложной конфигурации.

Ключевые слова: лабиринтное уплотнение; вычислительная гидродинамика; аэродинамические силы

Введение

Одной из актуальных проблем при проектировании ГТД на сегодняшнее время является повышение его экономичности. Увеличение коэффициента полезного действия (КПД) двигателя напрямую связано с уменьшением перетечек рабочего тела в компрессоре и турбине. Для снижения перетечек применяются различные виды лабиринтных уплотнений, и многие из них могут явиться потенциальным источником повышенных вибраций и потери устойчивости роторных систем из-за возникновения в них аэродинамических циркуляционных сил. Данная проблема особенно актуальна для турбоагрегатов большой мощности, с большим количеством ступеней компрессоров и турбин и большим количеством уплотнений между ними по бандажированным лопаткам и валам. Совершенствование методов анализа вибраций в турбомашинах, в том числе газотурбинных двигателях для агрегатов меньшей мощности требует продолжения исследований в этом направлении и создания методических основ оценки устойчивости роторных систем.

Исследования лабиринтных уплотнений проводятся на протяжении многих лет. Изначально большая часть работ базировалась на экспериментальных данных. Алфорд изучал лабиринтные уплотнения с разными входными и выходными площадями [2]. По результатам его работы была определена зависимость отношения площадей входа и выхода на возникающие в уплотнении возбуждающие силы. Эта работа, а также некоторые другие позволили создать методики для приближенной оценки циркуляционных сил в уплотнениях осевых и центробежных компрессоров и их влияния на устойчивость роторов. Американский институт нефти и газа (API) выпустил стандарт с уточненными методиками устойчивости роторов с осевыми и центробежными компрессорами [1] на базе модифицированной формулы Алфорда. Вместе с тем в стандарте показана необходимость в отдельных случаях использовать точные оценки циркуляционных сил. Повышение точности результатов требовало создания специальных методик. Работы в этих направлениях велись и сейчас ведутся многими исследователями. Среди них можно выделить работы [7], [4], [5].

Появление универсальных программных комплексов для решения задач вычислительной гидродинамики позволило решать практические задачи проектирования турбомашин с меньшими трудозатратами. В многочисленных исследованиях показаны результаты применения таких программ для решения задач устойчивости роторов [8], [9] и др. Например, в исследованиях Бенкерта и Вохтера [3], получены жесткостные коэффициенты, позволяющие учесть циркуляционные силы в задаче роторной динамики конкретного объекта. В работе [6] рассмотрены циркуляционные силы и влияние на них частоты вращения и эксцентриситета прецессионного движения, и т.д.

Задачей настоящего исследования является разработка методики моделирования уплотнений различной конфигурации и расчета течений в лабиринтных уплотнениях с учетом окружной неравномерности зазоров с целью определения возникающих в них аэродинамических сил, а также определения их влияния на динамику роторных систем. В данной статье приводятся результаты исследования первой части поставленной задачи.

Расчетная модель течения в уплотнении

Для проведения исследований использовалась модель, представленная в работе [3]. Схема уплотнения показана на Рис. 1. Геометрическая модель канала течения представлена на Рис. 2. Значения параметров представлены в Таблице 1.

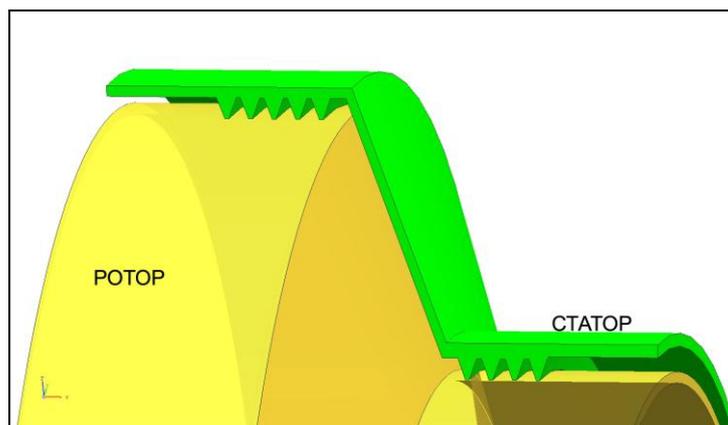


Рис. 1. Схема уплотнения

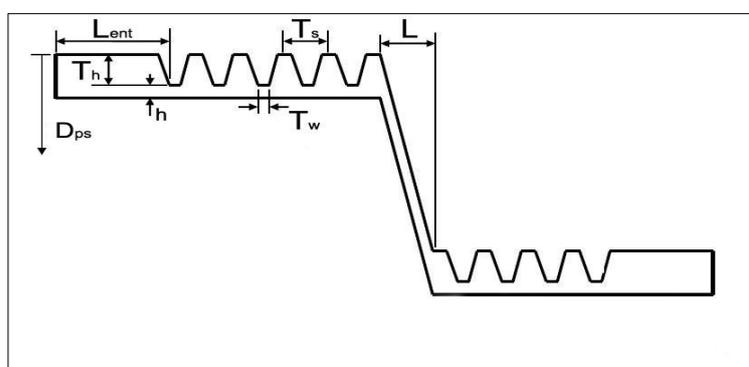


Рис. 2. Геометрическая модель исследуемой области

Таблица 1. Геометрические характеристики модели

Величина	Значение
Диаметр D_{ps} , мм	188,5
Радиальный зазор h , мм	0,127
Шаг зуба T_s , мм	2,49
Высота зуба T_w , мм	0,406
Протяженность входа L_{ent} , мм	12,45
Горизонтальное расстояние L , мм	9,4

Исходные данные параметров потока задавались в качестве граничных условий в соответствии с Таблицей 2.

Таблица 2. Граничные условия для расчета

Давление на входе	13,1 МПа
Температура на входе	321 К
Давление на выходе	8,28 МПа

На первом этапе исследований в качестве модели использовался сектор уплотнения в 2° (Рис. 3) с заданием условия периодичности на боковых поверхностях. Сектор в 2° был выбран как минимально возможный для корректного описания модели и рационального использования вычислительной мощности. Для получения сетки использовался программный комплекс ANSYS ICEM CFD.

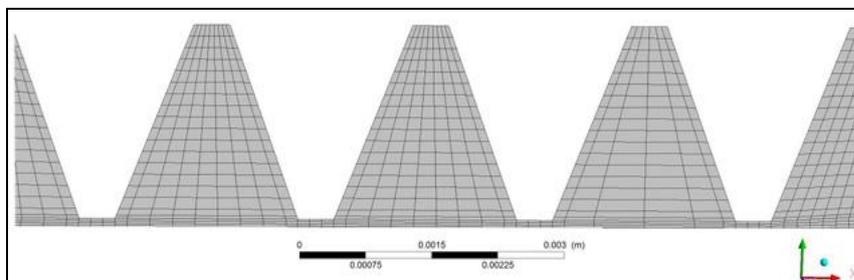


Рис. 3. Фрагмент сеточной модели

Для оценки влияния сеточной дискретизации на результаты расчета были подготовлены два варианта сеточной модели: подробный вариант сеточной модели (145000 элементов) и упрощенная сеточная модель (55000 элементов). При этом для обоих случаев высота первого пристеночного элемента равна 0,01 мм, а минимальный угол составляет не менее 50° . Проведенные расчеты показали, что увеличение элементов сеточной модели незначительно сказывается на распределении параметров, но увеличивает время сходимости расчета с 2 до 3,5 часов. Таким образом, укрупнение сетки оправдано лишь в радиальном направлении для лучшего описания пограничного слоя.

Газодинамические расчеты проводились в программном комплексе ANSYS-CFX. В качестве рабочего тела в расчете используется идеальный газ. Расчеты проведены по схеме High Resolution. С целью определения основных параметров и особенностей потока в камерах ЛУ использовалась SST модель турбулентности, модель теплопереноса – Total energy.

Многочисленные исследования в области гидродинамики показывают, что течение в щелевых уплотнениях сопровождается образованием вихрей Тейлора-Гертлера. Вихри Тейлора-Гертлера образуются в жидкости, находящейся в зазоре между двумя вращающимися коаксиальными цилиндрами. При таких условиях возникает неустойчивое расслоение жидкости. Частицы, находящиеся вблизи внутренней стенки, стремятся под действием центробежной силы переместиться в наружные слои. При постепенном увеличении скорости вращения, начиная с какого-то момента, в жидкости возникают правильно чередующиеся вихри в виде торов с правым и левым вращением, На Рис. 4

показаны вихри, рассчитанные для кольцевой щели при протекании идеального газа (диаметр 50 мм, зазор 5 мм, давление атмосферное, частота вращения внутреннего цилиндра – 4000 об/мин).

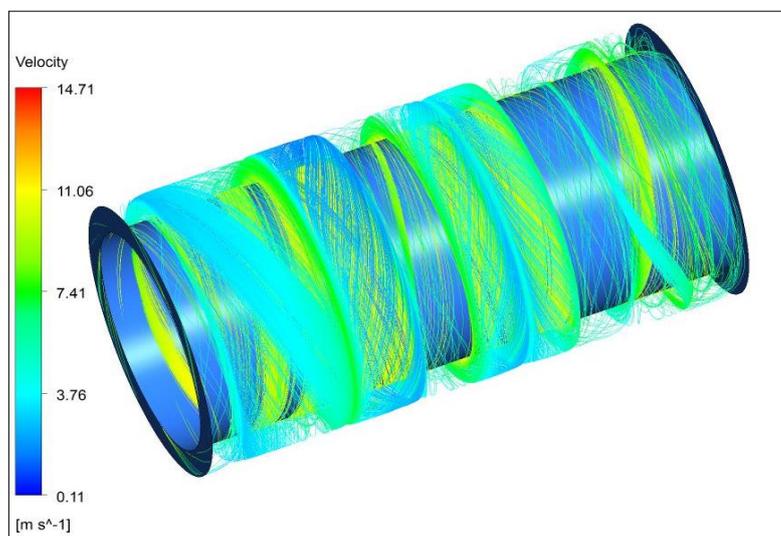


Рис. 4. Вихри Тейлора-Гертлера в кольцевой щели

С учетом вышесказанного не представляется возможным использовать в качестве модели уплотнения только сектор лабиринтного уплотнения, т.е. необходимо создать и исследовать полноразмерную модель в 360° . После моделирования размерность сеточной модели исследуемого уплотнения составила $\sim 3,5$ млн гексаэлементов.

Результаты расчетов

В результате моделирования течения в зазоре рассчитывалась результирующая аэродинамическая сила F и исследовалась ее зависимость от величины эксцентриситета. На Рис. 5 показана схема прецессионного движения Ω вала ротора и проекции аэродинамической силы F_r (радиальная составляющая) и F_t (тангенциальная составляющая) на оси Y и Z , используемой в расчетной модели правосторонней системы координат XYZ .

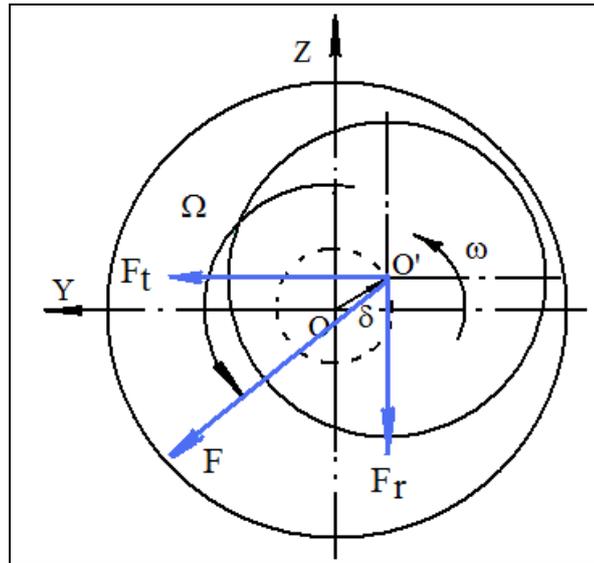


Рис. 5. Обобщенная схема прецессионного движения ротора в зазоре лабиринтного уплотнения. Направление аэродинамической силы F показано условно

Окружная неравномерность зазора, возникающая вследствие прецессионного движения ротора под действием неуравновешенных сил, моделировалась с помощью задания различных по величине эксцентриситетов кругового прецессионного движения δ (Таблица 3). Эксцентриситет δ задавался смещением ротора (внутренней стенки канала уплотнения) по оси Z . Частота вращения ротора вокруг оси X $\omega=21662$ об/мин.

Таблица 3. Значения рассматриваемых эксцентриситетов

Относительный эксцентриситет \bar{c}	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6
Эксцентриситет δ , мм	0,013	0,0254	0,0381	0,0635	0,0762
Радиальный зазор h , мм	0,127				

По результатам расчета получены картины течения в лабиринтном уплотнении. Время расчета течения для одного значения эксцентриситета на Intel Xeon X7350 с 16Гб оперативной памяти составило 1 час 48 минут. Течение в лабиринтном уплотнении показано на Рис. 6.

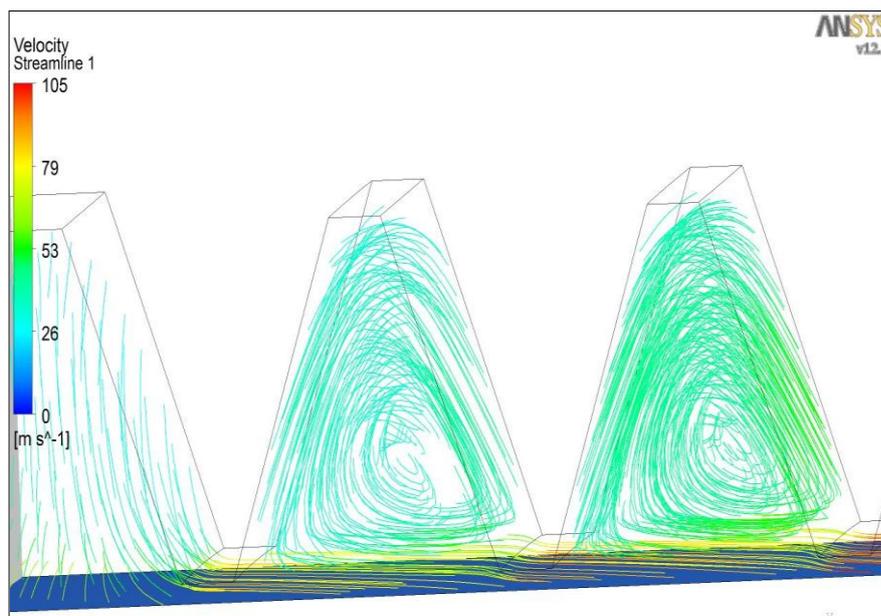


Рис. 6. Течение в лабиринтном уплотнении

На Рис. 7 показано распределение скоростей потока по сечению OXZ уплотнения в положении без эксцентриситета и с максимальным эксцентриситетом. Видно, что при увеличении эксцентриситета происходит поджатие потока и местное увеличение его скорости.

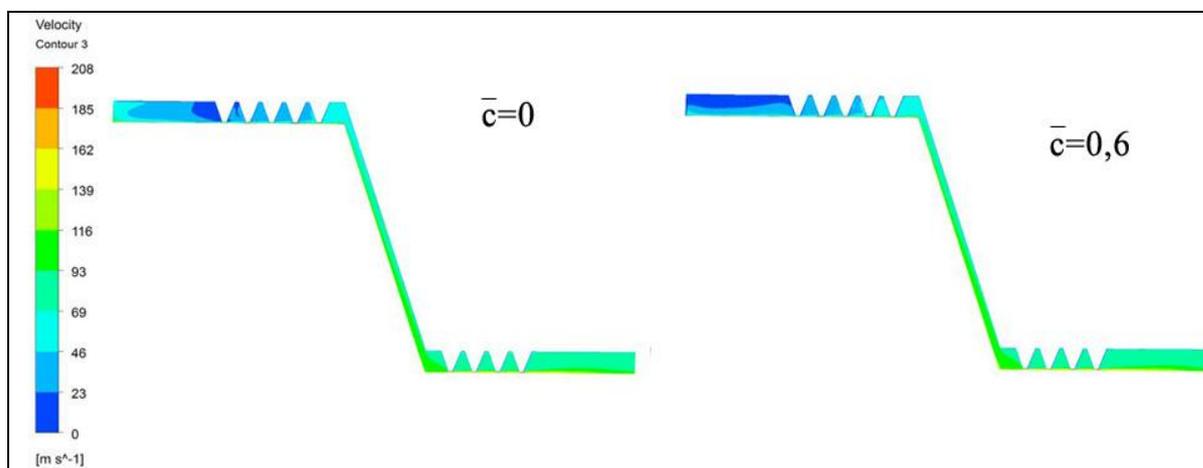


Рис. 7. Распределение скорости по сечению OXZ для граничных вариантов

В результате расчетов были получены зависимости изменения аэродинамической силы от эксцентриситета. Увеличение радиуса прецессионного движения ведет к росту радиальной и тангенциальной силы. Результаты расчета представлены в таблице 4 и на Рис.8.

Таблица 4. Результаты расчета

Относительный эксцентриситет $\frac{\delta}{c}$	Эксцентриситет δ , м	Проекция силы на ось Y, Н	Проекция силы на ось Z, Н	Результирующая сила, Н
0,1	1,34E-05	-57,7	77,3	96,479
0,2	2,54E-05	-103,0	86,5	134,5058
0,3	3,81E-05	-113,4	45,0	122,0581
0,5	6,35E-05	-148,5	169,7	225,5802
0,6	7,62E-05	-189,9	170,4	255,1896

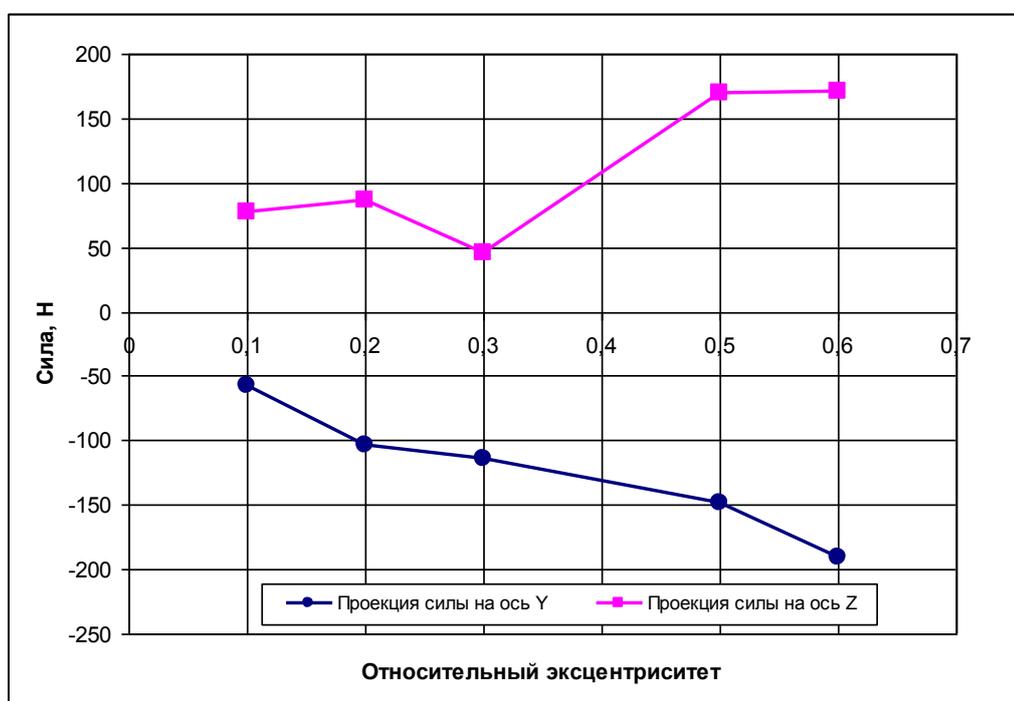


Рис. 8. Значение проекций гидравлических сил при различных эксцентриситетах

Заключение

В результате расчетных исследований создана модель двухступенчатого лабиринтного уплотнения и проведены расчеты аэродинамических циркуляционных сил, возникающих в условиях прецессионного движения ротора с использованием методов и программ вычислительной гидродинамики. Проведена оптимизация сеточной дискретизации модели с целью уменьшения необходимых вычислительных ресурсов. Исследовано влияние эксцентриситета прецессионного движения на значения циркуляционных сил. Рассчитаны проекции гидравлических сил, которые действуют на роторную систему. В исследовании была выполнена первая часть задачи - определение аэродинамических сил при заданном

эксцентриситете, а также разработана общая методика моделирования и расчета течения в лабиринтных уплотнениях сложной конфигурации. В дальнейших работах по проблеме планируется исследование влияния частоты вращения на значения циркуляционных сил, определение аэродинамических упругих коэффициентов для различных значений эксцентриситетов с учетом частоты вращения ротора, и исследование влияния этих сил на устойчивость роторов в задачах роторной динамики турбомашин.

Библиографический список

1. API Standard 617, 2002, Axial and Centrifugal Compressors and Expander-Compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services, Second Edition, American Petroleum Institute, Washington, D.C.
2. Alford, J.S.: Protecting turbomachinery from self-excited whirl. ASME J. Eng. Power 5, 333–344 (1965).
3. Benckert H., Wachter J., Flow induced spring coefficients of labyrinth seals for application in rotor dynamics. NASA CP 2133, 1980, 189-212.
4. Childs, D.W.: Finite-length solutions for rotordynamic coefficients of turbulent annular seals. ASME J. Lubrication Technol. 105, 437–444 (1983)
5. Dursun, E.: Rotordynamic coefficients in stepped labyrinth seals. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 191, 3127–3135 (2002).
6. Elizabeth D. Thompson, Study of Forces and Dynamic Coefficients in Whirling and Eccentric Labyrinth Seal Using ANSYS-CFX, ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air, 2007.
7. Thomas, H.J.: Unstable oscillations of turbine rotors due to steam leakage in the sealing glands and the buckets. Bull. Sci. A.J.M., 71, 223–236 (1958)
8. Yucel, U.: Calculation of leakage and dynamic coefficients of stepped labyrinth gas seals. Appl. Math. Comput. 152, 521–533 (2004).
9. Y. Z. Liu · W. Z. Wang · H. P. Chen · Q. Ge · Y. Yuan. Influence of leakage flow through labyrinth seals on rotordynamics: numerical calculations and experimental measurements. Arch Appl Mech (2007) 77: 599–612. DOI 10.1007/s00419-007-0119-z.

Сведения об авторах

Брыкин Борис Витальевич, аспирант Московского авиационного института (государственного технического университета); НТЦ им. Люльки (ОАО "НПО "САТУРН").

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: 8-901-502-26-86; e-mail:
borisbrykin@yandex.ru

Леонтьев Михаил Константинович, профессор Московского авиационного института
(государственного технического университета); доктор технических наук. МАИ,
Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: 8-985-768-71-29; e-mail:
lemk@alfatran.com