

УДК 621.59

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ТУРБОДЕТАНДЕРЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ КРИОСТАТИРОВАНИЯ

**Д.В. Клименко
С.Ф. Тимушев
В.П. Фирсов
И. В. Антюхов**

Московский авиационный
институт
(национальный
исследовательский университет)
Волоколамское шоссе, 4,
г. Москва, Российская Федерация,
125993
irico.harmony@gmail.com

В работе проведено численное моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточной части турбодетандера - радиальной турбины, применяемой в системе криостатирования. Геометрия расчётной области разработана с тем, чтобы учесть основные особенности течения рабочего тела в проточной полости, включая геометрию четырнадцати рабочих лопаток и восьми лопаток соплового аппарата. Расчётная область разбита на три подобласти: корпус соплового аппарата, область ротора, выхлопная часть. Задача решается с применением так называемых скользящих поверхностей, которые служат для передачи данных из зоны ротора, где расчёт ведётся во вращающейся системе координат, в зону статора, с учётом углового смещения подобластей и межсеточной интерполяции. Шаг расчёта по времени выбирается из условия обеспечения углового смещения за один шаг в пределах одной ячейки расчётной сетки. В результате расчётов были получены мгновенные поля скоростей, распределения давления, температуры и числа Маха. Для определения пульсаций давления выбраны точки в зоне косоого среза лопаток соплового аппарата. Проведён спектральный анализ полученных данных, который показал, что тональная компонента с частотой следования рабочих лопаток доминирует в спектрах пульсаций давления, а ее амплитуда составляет свыше 7000 Па. Расчёт нагрузки на лопатку соплового аппарата дает амплитуды силы 2 Н и амплитуду момента 0.03 Н·м.

Ключевые слова: криорефрижератор; турбодетандер; скользящая поверхность; численное моделирование; спектры пульсаций давления; частота следования лопаток.

1 Введение

Современные системы криостатирования находят важное применение в контурах электропитания, в космических транспортных системах. Они представляет собой замкнутую гидравлическую систему, предназначенную для обеспечения температурного и теплового режимов работы сверхпроводящих кабельных линий, баков с криогенным топливом для ракетно-космических блоков. В качестве рабочей среды используется жидкий азот. Одним из главных узлов такой системы является криорефрижератор. В криорефрижераторе используется схема компримирования и расширения неона с помощью компрессорных машин и турбодетандера на газостатических опорах. Актуальной задачей на этапе проектирования является определение колебаний давления в проточной части турбодетандера и динамического нагружения элементов конструкции.

Современные системы криостатирования находят также важное применение в линиях высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), в современных проектах космических блоков с криогенным топливом на борту.

Одним из главных узлов такой системы является криорефрижератор.

В криорефрижераторе используется схема компримирования и расширения неона с помощью компрессорных и турбодетандерных машин [1, 2] на газостатических опорах.

Развитие и совершенствование малорасходных радиальных турбодетандеров и центробежных компрессоров позволяет отказаться от громоздких и сложных в изготовлении осевых турбомашин и выполнить криорефрижератор на компактных радиальных турбомашинах. Это связано с тем, что в последние несколько лет появились высокоэффективные турбомашины (компрессоры и детандеры).

Другая современная тенденция – замена в высокооборотных турбоагрегатах прецизионных опор качения на радиальные и осевые газостатические подшипники.

В настоящее время газостатические опоры достаточно широко используются в криогенных машинах в связи с возможностью обеспечения высоких частот вращения, надёжной работой при низких температурах, отсутствием загрязнения объекта охлаждения продуктами смазки. Газостатические опоры позволяют производить бесконтактный запуск машины с нулевого числа оборотов, что значительно увеличивает надёжность узла газовых подшипников. По своим характеристикам эти опоры можно отнести к классу опор с неограниченным ресурсом работы. Газостатические опоры отличает высокая несущая способность, возможность работы в любом диапазоне температур, большие технологические зазоры, в меньшей степени подверженные влиянию температурных деформаций.

При проектировании агрегатов на газостатических подшипниках особое внимание уделяется вопросам снижения осевых усилий, уменьшения нагрузки на осевые подшипники, снижения виброактивности, что в целом повышает надёжность системы. В этой связи возникает необходимость информации о величинах нестационарных нагрузок, действующих на элементы проточной части. Такая информация для радиальных турбин недостаточно представлена в научно-технической литературе, носит узкоспециализированный характер [3]. Использование методов численного моделирования для расчёта параметров потока в проточной части турбомашин позволяет не только оптимизировать энергетические характеристики турбомашин, но и проанализировать нестационарные нагрузки, действующие на элементы проточной части.

2 Численный метод и использованные модели

В процессе численного моделирования применены математические модели, включённые в пакет программного обеспечения вычислительной гидродинамики [4].

Они описывают движение однородной жидкости при различных скоростях с учётом эффектов сжимаемости, турбулентности и теплопереноса, включая модель теплопереноса в твёрдом теле для задачи сопряжённого теплообмена при учёте теплопереноса между газом и твёрдым телом, k - ε модель турбулентного течения жидкости [5] для моделирования течения газа при больших и малых (турбулентных) числах Рейнольдса в нестационарной постановке при любых числах Маха.

При расчёте сопряжённого теплообмена и аэродинамики задаются так называемые опорные величины. Абсолютные значения переменных определяются через опорные и относительные (f) величины следующим образом:

$$f_{abs} = f + f_{ref}$$

При определении граничных и начальных условий используются относительные величины.

Система конечно-разностных уравнений вычислительной гидродинамики и теплообмена решается нестационарным численным методом на прямоугольной сетке с локальной адаптацией и подсеточным разрешением сложной геометрии. В расчётной области определяется начальная прямоугольная сетка. Выделяются подобласти геометрии (граничные условия), в которых необходимо провести расчёт на более густой сетке. В этих под областях производится адаптация начальной расчётной сетки, при которой ячейки начальной сетки делятся на 8 равных ячеек. Далее, если необходимо, ячейки делятся ещё раз и так до достижения необходимой точности. Ячейки начальной сетки называются ячейками уровня 0, ячейки, получаемые измельчением уровня 0, называются ячейками уровня 1 и т. д. Соответствующая сетка называется сеткой нулевого, первого уровня адаптации и т. д. Метод подсеточного разрешения геометрии предназначен для аппроксимации криволинейных границ на прямоугольной сетке. Ячейки, через которые проходит граница, теряют свою первоначальную форму параллелепипеда и превращаются в многогранники произвольной формы. Такой подход позволяет с доста-

точной степенью точности производить расчёты, минимизируя вычислительные ресурсы и процессорное время.

3 Описание установки

Турбодетандерная установка состоит из смонтированных на одном валу рабочего колеса радиальной турбины и центробежного компрессора первой ступени, который выполняет также функцию газодинамического тормоза. Газ подается в корпус детандера по двум трубопроводам. Далее он ускоряется в сопловом аппарате и поступает на лопатки рабочего колеса. После расширения и снижения температуры выхлоп газа идет через осевой диффузор. Частота вращения ротора составляет 25200 об/мин.

Система криостатирования представляет из себя замкнутую гидравлическую систему, предназначенную для обеспечения температурного и теплового режимов работы сверхпроводящих кабельных линий, баков с криогенным топливом для ракетно-космических блоков. В качестве рабочей среды используется жидкий азот.

Система криостатирования обеспечивает непрерывную подачу жидкого азота в протяжённые криостаты с температурой (64...65 K) и расходом до 1,5 кг/с с давлением до 20 бар. Непрерывная циркуляция жидкого азота с минимальными теплопритоками к охлаждающей среде в протяжённых криостатах, входящих в контур криостатирования, обеспечивается циркуляционным насосом.

Устройством, обеспечивающим охлаждение жидкого азота, является криорефрижератор.

Криорефрижератор – система, предназначенная для охлаждения рабочего тела (газообразного неона) до заданной температуры и подачи его в основной теплообменный аппарат, в котором происходит отвод тепла от жидкого азота и его переохлаждения перед подачей в контур криостатирования силового кабеля. Криорефрижератор, в общем случае, является разомкнутой системой, которая создаёт единый замкнутый контур с системой криостатирования посредством теплообменного аппарата нагрузки, где обеспечивается охлаждение жидкого азота газообразным неоном с температурой 56..65 K. В

криорефрижераторе реализуется газовый детандерный холодильный цикл на базе радиальных турбокомпрессоров, радиального турбодетандера и компактных пластинчаторебристых теплообменников. Неон позволяет в несколько раз сократить количество ступеней сжатия компрессора по сравнению с гелиевым контуром и значительно уменьшить стоимость компрессорного оборудования. Так как минимальная температура в контуре криорефрижератора не превышает 56 K, то сохраняется газообразное состояние неона. Неоновый контур имеет меньшие потери рабочего тела при работе по сравнению с гелиевым контуром.

Турбодетандер состоит из рабочего колеса радиальной турбины и центробежного компрессора первой ступени, который выполняет также функцию газодинамического тормоза. Частота вращения ротора составляет 25200 об/мин.

Газ подаётся по двум трубопроводам в корпус детандера. Далее рабочий газ ускоряется в сопловом аппарате и поступает на лопатки рабочего колеса. После расширения и снижения температуры выхлоп газа идёт через осевой диффузор.

4 Расчётная область

Геометрия расчётной области разработана с тем, чтобы учесть основные особенности течения рабочего тела в проточной полости, включая геометрию рабочих лопаток и лопаток соплового аппарата. Расчётная область (рисунок1) разбита на три подобласти: корпус соплового аппарата, область ротора, выхлопная часть. Задача решается с применением так называемых скользящих поверхностей, которые служат для передачи данных из зоны ротора, где расчёт ведётся во вращающейся системе координат, в зону статора, с учётом углового смещения подобластей и межсеточной интерполяции. Шаг расчёта по времени выбирается из условия обеспечения углового смещения за один шаг в пределах одной ячейки расчётной сетки.

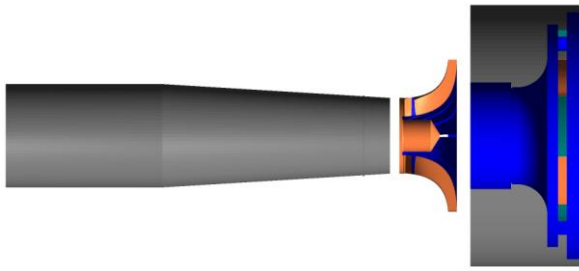


Рисунок 1. Меридиональное сечение расчётной области

На рисунке 2 показана расчётная сетка на виде в плане. Сетка адаптируется в зоне лопаток соплового аппарата и рабочего колеса для разрешения градиентов потока. Это особенно важно для определения параметров нестационарного газодинамического взаимодействия потока, выходящего из соплового аппарата, с вращающимися лопатками рабочего колеса.

Расчёт ведётся с шагом по времени $4e-06$ с, что даёт около 42 точек на период прохождения рабочих лопаток

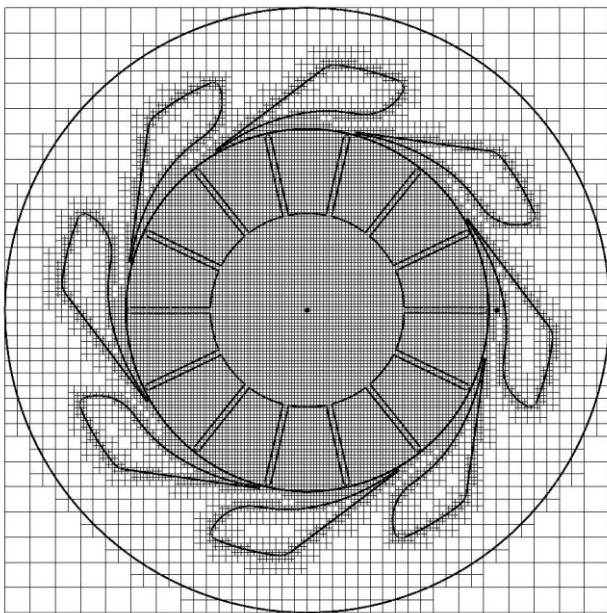


Рисунок 2. Расчётная сетка в зоне соплового аппарата

5 Результаты расчётов

Нестационарное решение устанавливается по температурному перепаду на уровне 21 градуса. Такое завышенное значение получается из-за неучёта потерь на утечки, потерь в радиальном зазоре и теплопритоков извне.

Величины скоростей вдоль косого среза межлопаточного канала соплового аппарата изменяются неравномерно. Мгновенное распределение числа Маха указывает на существенную неравномерность распределения этого параметра, связанную с угловым положением рабочего колеса относительно лопаток соплового аппарата. Ускорение потока дополнительно происходит в районе выходных кромок рабочего колеса, создавая окружную неравномерность параметров потока, которая периодически меняется при прохождении лопаток рабочего колеса.

Для фиксации пульсаций давления выбраны четыре точки в зоне косого среза лопаток соплового аппарата, как показано на рисунке 3.

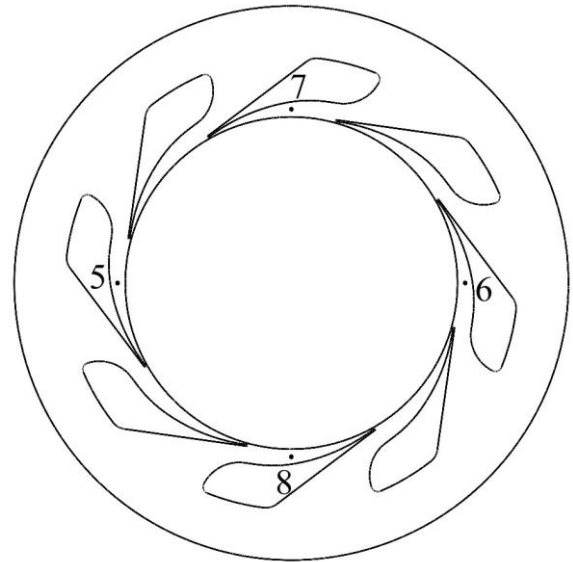


Рисунок 3. Точки фиксации давления в каналах соплового аппарата

Соответствующие графики изменения статического давления в указанных точках приведены на графике (рисунок 4). Сигналы пульсаций давления в противоположных точках 5 -6 и 7-8 совпадают по фазе. Частота пульсаций давления соответствует частоте прохождения рабочих лопаток.

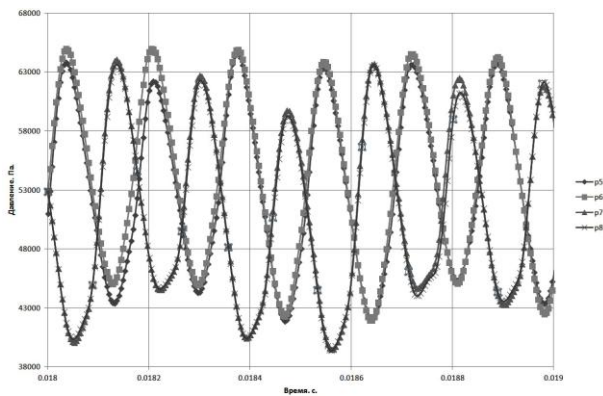


Рисунок 4. Пульсации давления в каналах соплового аппарата

Спектральный анализ пульсаций давления (рисунок 5) показывает, что тональная компонента с частотой следования лопаток доминирует в спектре, а её амплитуда составляет свыше 7000 Па.

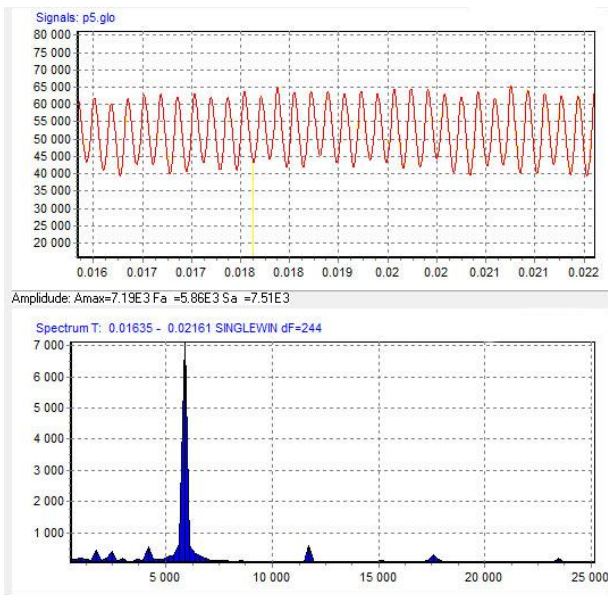


Рисунок 5. Сигнал и спектр пульсаций давления в точке 5

В ходе расчёта были определены нагрузки на лопатки соплового аппарата. Амплитуда силы, действующей на лопатку, составила 2 Н (рисунок 7).

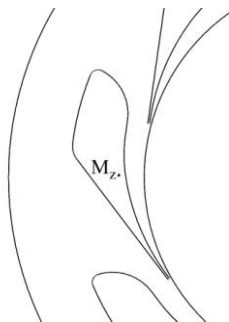


Рисунок 6. Точка приложения силы и момента на лопатке соплового аппарата

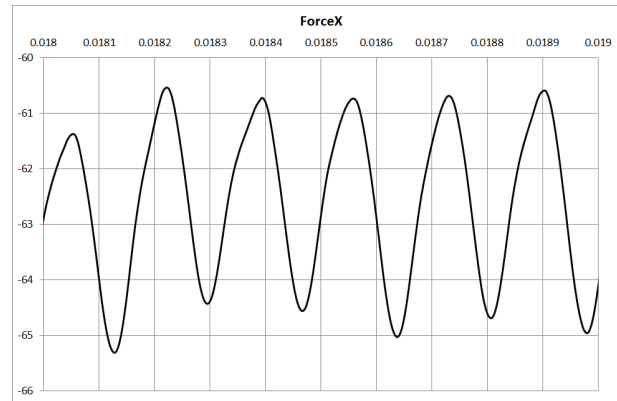


Рисунок 7. Сила, действующая на лопатку соплового аппарата

6 Заключение

В результате численного моделирования нестационарного течения в турбодетандере криорефрижиратора получены мгновенные поля скоростей, распределения давления, температуры и числа Маха. Для определения пульсаций давления выбраны точки в зоне косого среза лопаток соплового аппарата. Проведён спектральный анализ полученных данных, который показал, что тональная компонента с частотой следования рабочих лопаток доминирует в спектрах пульсаций давления, а её амплитуда составляет свыше 7000 Па. Расчёт нагрузки на лопатку соплового аппарата даёт амплитуду силы 2 Н и амплитуду момента 0,03 Н м.

Список использованных источников

- [1] Техника низких температур [под ред. Е.И. Микулина И.В. Марфениной, А.М. Архарова], М.: Энергия, 1975.
- [2] Елифанова В.И. Низкотемпературные радиальные турбодетандеры. М.: Машиностроение, 1974.
- [3] Fredrik Hellström Numerical computations of the unsteady flow in a radial turbine March 2008 Technical Reports from Royal Institute of Technology KTH Mechanics SE-100 44 Stockholm, Sweden.
- [4] Software package for gas and fluid flow simulation FlowVision. Version 2.5.0. Manual CAPVIDIA, 1999-2007 Leuven, Belgium.
- [5] Wilcox, D. C., (1994) "Turbulence modeling for CFD" // DCW Industries, Inc. 460 p.

NUMERICAL SIMULATIONS OF DYNAMIC LOADS IN AVIATION COMBINED PUMPS

D.V. Klimenko
S.F. Timushev
V.P. Firsov
I.V. Antukhov

Moscow Aviation Institute
(National Research University)
4, Volokolamskoye shosse,
Moscow,
125993, Russian Federation
irico.harmony@gmail.com

Modern cryostatting systems find important applications in power and space transportation systems. The cryostatting system is a closed hydraulic loop for the thermal management and control of thermal modes of superconducting cable lines, cryogenic rocket and space units fuel tanks. The working medium is liquid nitrogen. One of the main components of such a system is the criorefrigerator. In the criorefrigerator compression scheme is used with following expansion of neon in the turboexpander, machine with gas-static bearings. Urgent task in the design phase is to determine the pressure fluctuations in the flow of the turbo expander and dynamic loading of the structure. This paper presents the numerical simulation of unsteady gas-dynamic processes in the turbo expander radial turbine flow. Expansion turbine consists of mounted on the same shaft the radial turbine impeller and centrifugal compressor first stage, that also serves as a gas-dynamic brake. Gas is fed to the expander casing through two pipelines. Further, it is accelerated in the nozzle cascade and enters the turbine impeller blades. After expansion and reduction the temperature, the exhaust gas passes through the axial diffuser. Rotor speed is 25,200 rev / min. The geometry of the computational domain is developed in order to capture the main features of the flow in the working fluid cavity, including the geometry of fourteen working blades and eight vanes of the nozzle cascade. The computational domain is divided into three subregions: the casing of the nozzle cascade, rotor and exhaust part. The problem is solved with the use of so-called sliding surfaces which serve for transmitting the data from the rotor, where the calculation is carried out in a rotating coordinate system into the stator zone accounting an angular displacement and sub-grid interpolation. Time step chosen from the condition to ensure the angular displacement in one time step within a single cell of the computational grid. The instantaneous velocity, pressure, temperature and Mach number fields are obtained with calculations. Few points in the nozzle vane channel oblique zones are selected to fix pressure pulsations. The spectral analysis of the data reveal that the tonal component with blades passing frequency dominates the spectra of pressure pulsations, its amplitude is above 7000 Pa. Calculation of loading on nozzle blade gives the amplitude of force 2 N and amplitude of momentum 0.03 N m

Key words: criorefrigerator; turbo-expender; sliding surface; numerical modelling; pressure pulsation spectra; blade passing frequency.

References

- [1] Tekhnika nizkix temperatur. Pod red. E.I. Mikulina, I.V. Marfeninoy, A. M. Arxarova, M.: E'nergiya, 1975.
- [2] Epifanova V.I. Nizkotemperaturny'e radial'ny'e turbodetandery'. M.: Mashinostroenie» 1974.
- [3] Fredrik Hellström Numerical computations of the unsteady flow in a radial turbine March 2008 Technical Reports from Royal Institute of Technology KTH Mechanics SE-100 44 Stockholm, Sweden.
- [4] Software package for gas and fluid flow simulation FlowVision. Version 2.5.0. Manual CAPVIDIA, 1999-2007 Leuven, Belgium.
- [5] Wilcox, D. C., (1994) "Turbulence modeling for CFD" // DCW Industries, Inc. 460 p.