

ными правыми частями, которые уточняются итерационно. Для дискретизации по пространству используется метод контрольных объемов. Для определения потоков через границы контрольных объемов используется DRP подход (dispersion relation preserving). Совместное использование идеологии DRP и рядов Фурье позволяет адаптировать коэффициенты дискретизации по пространству под конкретный режим течения, и, как следствие, получить более точное решение. Для учета колебаний лопаток система уравнений движения переписана в подвижной системе координат – используется деформируемая криволинейная структурированная расчетная сетка.

При постановке граничных условий на открытых границах, вход и выход из расчетной области, использован PML-метод (Perfectly Matched Layer) [3]. Метод основан на модификации интегрируемых уравнений в приграничной области. Уравнения модифицируются таким способом, чтобы выходящие из расчетной области возмущения затухали в приграничном слое ячеек и не отражались от границ.

УДК 519.6:533.6:621.452

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К ФЛАТТЕРУ ЛОПАТКИ КНД ПЕРВОЙ СТАНДАРТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ**

Шуваев Н.В.

ОАО «НПО «Сатурн», г. Пермь

### **A NUMERICAL INVESTIGATION OF FLUTTER STABILITY FOR THE FIRST STANDARD CONFIGURATION BLADES**

*Shuvaev N.V. Energy and quasi-conjugate methods are applied to the 2D blade flutter problem. Calculations are performed using ANSYS CFX. Blade surface displacements are taken into account by applying moving mesh. Numerical and experimental cascade results are compared.*

В работе рассматриваются два подхода к определению флаттера: энергетический (вычисление работы за цикл при заданном режиме колебаний) и прямое численное моделирование колебательного процесса путем решения квазисопряженной задачи. В качестве объекта исследования используется

Представлены результаты численного моделирования течения воздуха через плоскую решетку профилей первой стандартной конфигурации [4]. Наблюдается хорошее соответствие результатов расчетов экспериментальным данным.

### **Библиографический список**

1. Августиневич, В.Г. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях / В.Г. Августиневич, Ю.Н. Шмотин [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. – 536 с.
2. Marshall, J. G. Some Applications of a Time-Linearized Euler Method to Flutter & Forced Response in Turbomachinery / J. G. Marshall, M. B. Giles // Proceedings of ISUAAAT 1997.
3. Hu, F.Q. On Using Perfectly Matched Layer for the Euler Equations with a Non-Uniform Mean Flow / F.Q. Hu // AIAA Paper 2004-2966, 2004.
4. Fransson, Т.Н. Aeroelasticity in turbomachines: comparison of theoretical and experimental cascade results / Т.Н. Fransson // Lausanne, EPFL, 1986.

плоская решетка профилей первой стандартной конфигурации.

Все расчеты проведены в ПК ВГД ANSYS CFX 11. Для учета изменения положения границ расчетной области в процессе счета используется подвижная структурированная расчетная сетка.

В рамках энергетического подхода решена задача о синфазных крутильных колебаниях лопаток с заданной частотой и амплитудой [1]. Нестационарный расчет проведен до установления периодического течения. По результатам стационарного и нестационарного расчетов найдено распределение по поверхности лопатки коэффициента давления, а также его модуля и фазы (рис. 1). Показано хорошее совпадение результатов расчета с данными эксперимента.

Найдена величина работы газа за один период колебаний лопатки, положительный знак которой свидетельствует о реализации необходимых условий наступления флаттера. Единственным способом проверки достаточности данных условий является решение сопряженной задачи.

В статье [2] предложен подход, позволяющий определять перемещения границ твердого тела по заданным материальным константам (матрицам масс, жесткости,

демпфирования) и значениям мгновенных аэродинамических сил. В основе данного подхода лежит представление движения лопатки как совокупности движений по собственным формам колебаний, которые считаются неизменными в процессе расчета. В двумерном приближении движение лопатки по первым крутильной и изгибной формам можно рассматривать как плоскопараллельное движение ее сечения.

В рамках данного подхода решена задача о колебаниях лопатки, имеющей 2 степени свободы: вращательную и переносную по направлению нормали к хорде. Материальные константы, характеризующие свойства подвески лопаток определены по значениям собственных частот крутильных и изгибных колебаний. В начальный момент времени лопатка находится в положении равновесия, затем мгновенно отклоняется на некоторый угол.

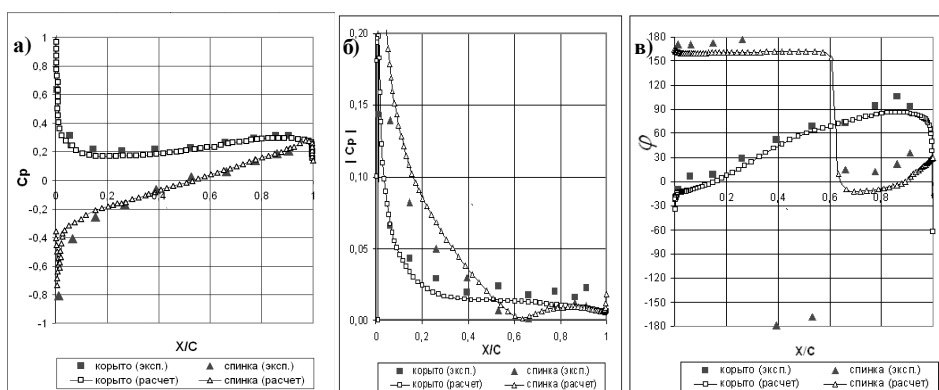


Рис. 1. Распределение коэффициента давления: среднее за период (а), колебания значений (б), фаза (в)

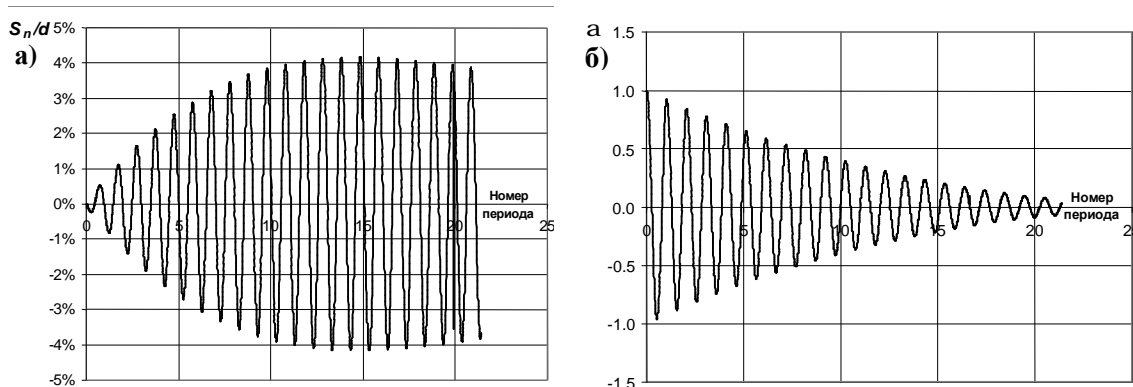


Рис. 2 – Перемещение по нормали к хорде (а) и угол отклонения профиля (б),  $d$  – максимальная толщина профиля

Проведенные расчеты с различными значениями собственных частот колебаний

лопатки и степенями свободы показывают, что во всех случаях наблюдается затухание

первоначального возбуждения и переход к установившимся колебаниям с малой амплитудой (рис. 2).

Основным достоинством энергетического подхода по сравнению с решением сопряженной задачи является относительная простота реализации, недостатком – возможность моделирования только установившихся колебательных процессов с заданным законом движения. Решение квазисопряженной задачи позволяет моделировать динамику рассматриваемого процесса, определять реализующиеся

частоты и амплитуды колебаний при флаттере.

#### **Библиографический список**

1. Fransson, T.H. Aeroelasticity in turbomachines: comparison of theoretical and experimental cascade results / T.H. Fransson. - Lausanne, EPFL, 1986.
2. Rządowski, R. 3D Unsteady Forces of the Transonic Flow Through a Turbine Stage with Vibrating Blades / R. Rządowski, V. Gnesin. - ASME Turbo Expo 2002, GT-2002-30311, 2002.

УДК 621.455(075)

### **ТУРБОНАСОСНЫЕ АГРЕГАТЫ КИСЛОРОДНО-КЕРОСИНОВЫХ ЖРД, РАЗРАБОТАННЫЕ КБХА**

Горохов В.Д., Дмитренко А.И., Иванов А.В., Рачук В.С.

Конструкторское бюро химавтоматики, г. Воронеж

#### **OXYGEN – KEROSENE LRE TURBOPUMPS DEVELOPED BY KBKHA**

Gorohov V.D., Dmitrenko A.I., Ivanov A.V., Rachuk V.S. Today are actual problem of new generation oxygen-kerosene LREs design and development. One of the main elements of engine is turbopump. This article dedicated to oxygen-kerosene LRE turbopumps developed by KBKHA.

Ракетное топливо маршевых жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) ракетносителей (РН) должно обладать высокими энергетическими характеристиками, быть экологически чистым и иметь малую стоимость. Из освоенных топлив этим требованиям в наибольшей степени отвечает кислородно-керосиновое топливо. Именно на этом топливе работали и работают маршевые двигатели первых ступеней РН типа «Восток», «Союз», «Энергия», «Зенит», «Сатурн-1В», «Сатурн-V» «Атлас», «Тор-Дельта». При этом отечественные ЖРД всех носителей, кроме РН типа «Союз», в отличие от двигателей РН США, выполнены по схеме с дожиганием генераторного газа в камере.

КБХА имеет опыт разработки турбонасосных агрегатов кислородно-керосиновых ЖРД, выполненных как с дожиганием (РД0124, РД0155), так и без дожигания генераторного газа (РД0105, РД0110, РД0163) в диапазоне тяг от 50 до 2500 кН.

Современные системы питания, включающие главный и бустерный турбонасосные агрегаты, являются важной составной

частью космических жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Уровень совершенства и надежность турбонасосных агрегатов оказывают заметное влияние на технические характеристики двигателей.

От экономичности главного турбонасосного агрегата (ТНА) в значительной мере зависит уровень такого важного параметра двигателя, как давление в его камере. Антикавитационными качествами насоса бустерного турбонасосного агрегата (БТНА) определяется уровень давления компонентов топлива в баках РН. Долговечность подшипников и рабочих лопаток турбины ТНА могут определять периодичность и стоимость межполетного ремонта двигателей. Для кислородно-керосиновых двигателей важной проблемой является обеспечение стойкости конструкции кислородного насоса и турбины в схеме с дожиганием окислительного генераторного газа к возгоранию.

В докладе рассмотрены ТНА кислородно-керосиновых ЖРД, разработанные КБХА, их параметры и особенности.