

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДОЗВУКОВОГО ПОТОКА И ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ЛОПАТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА. ОБЗОР МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ЗАДАЧ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В СИСТЕМЕ «ГАЗ-КОНСТРУКЦИЯ»\*

Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Статья посвящена обзору междисциплинарных задач и численному моделированию 2FSI процессов применительно к экспериментальной ступени компрессора. Разработаны физическая, твердотельная и сеточная модели системы «газ-ротор-статор». Проведен 2FSI расчет по оценке взаимовлияния газодинамического потока и деформирующейся лопатки ротора. Обсуждаются полученные результаты.

## 1. Введение

В процессе эксплуатации компрессоров могут возникнуть вибрации, сопровождающиеся увеличенными динамическими нагрузками на опоры и вызывающие снижение эксплуатационных характеристик. При значениях вибраций, превышающих допустимые, в действующем газоперекачивающем агрегате (ГПА) происходит его автоматическое выключение. Таким образом, возникают простои и необходимость иметь резервные мощности. Проблема вибраций проявляется не только в компрессорах газоперекачивающих станций, но является общей для турбомашиностроения [1].

Причин возникновения вибраций в лопаточных машинах несколько. Например, имеются технологические дисбалансы валов и других деталей вращения, возникают дисбалансы при монтаже. Необходим также учет процессов в магнитных подвесах. Кроме того, важным фактором, влияющим на вибрации, являются процессы в лабиринтных уплотнениях и в газодинамическом тракте.

Вместе с тем, учет взаимовлияния газодинамической нагрузки и влияния деформаций элементов конструкции в настоящее время остается открытым, несмотря на имеющиеся публикации. Как правило, анализ вибраций и аэродинамики выполняются по отдельности. Неучет значимых факторов приводит к тому, что вибрации в валопроводах ГПА на сегодняшний день не поддаются прогнозированию.

В целом, учет сложного взаимодействия в системе «газ — конструкция» (иначе FSI — Fluid-Structure Interaction) требуется и при моделировании задач о вибрациях лопаток турбины под воздействием потока воздуха, определении деформаций конструктивных элементов турбин и компрессоров, внутренней баллистики ракетных двигателей на смесевом твердом топливе, процессах флаттера крыла самолета, аэродинамики паруса или парашюта, срабатывании автомобильной подушки безопасности и пр. [2, 3, 4, 5].

## 2. Обзор

История аэроупругих численных расчетов ведет начало с работ, связанных с асимметричным флаттером, возникшем во время полета на бомбардировщике Хэндли-Пейдж. Немецкий физик, Пауль Рихард Генрих Блазиус в 1918 г. после поломки нижнего крыла биплана Albatros D3 произвел один из первых аналитических расчетов флаттера. Первый численный расчет аэродинамической силы, действующей на гармонически колеблющуюся тонкую пластинку в двумерном потоке, был проведен позднее, в 1922 г., В. Бирнбаумом в его диссертации, выполненной в Геттингенском университете [6, 7].

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00877)

К вопросам аэрогидроупругости с тех пор обращалось много исследователей. В 1972 году Вольмир А.С. описал вынужденные колебания пластины, подвергнутой действию периодически изменяющейся поперечной нагрузки [8]. В [9] подробно рассматривают проблему аэрогидроупругости и ее составных частей. Авторы рассматривают круг задач, в которых необходимо учитывать влияние среды на поведение конструкций и отмечают, что спектр таких задач постоянно расширяется [9]. Основной тенденцией развития техники является повышение энергомассовых характеристик, что приводит к тому, что нагрузки возрастают, а масса конструкций уменьшается, при этом снижается жесткость конструкций. В такой постановке все чаще могут возникать непрогнозируемые эффекты, типа «флаттер». Эти вопросы исследуются в работах [2]. Авторы рассматривают газопругий подход к расчету колебательных режимов в энергетических установках, приводят физическую и математическую модели процесса, предлагают унифицированный алгоритм и метод решения [2]. Приводится большое число решений модельных задач.

Исследователи из США [10], провели обзор связанных численных схем. Один из подходов они применили к вопросу изучения флаттера [10]. Исследованием вибраций лопастей ветряных турбин совместно занимались исследователи [11] трех стран: Китая, Австралии и Америки. Свои численные расчеты авторы проводили с учетом взаимовлияния потока газа и конструкции в прикладном программном пакете ANSYS. Ученые отмечают, что эффект от данного взаимодействия существенен, и его нельзя не учитывать [11]. О взаимодействии газодинамического потока и конструкции с профилем NASA0012 пишут исследователи из Китая [12]. Наряду с [2] подчеркивается, что деформации изменяют поле потока вокруг конструкции, в то время, как изменение поля давления газодинамического потока также влияет на деформации [14].

Как показано в [9], при решении задач аэроупругости приходится использовать методы теории упругости, аэромеханики и теории колебаний. Подобные задачи требуют моделирования междисциплинарных физических явлений. Совместный расчет аэродинамики и прочности является сложной задачей из-за различий математических моделей, методов решения, динамики расчетных областей и подходов к дискретизации уравнений.

Существуют два варианта связывания уравнений динамики деформирования твердого тела и уравнений газодинамики: монолитный и последовательный [3]. Монолитный подход подразумевает применение таких численных схем, результатом которых является формирование и последующее решение единой системы алгебраических уравнений. Последовательный подход к решению сопряженных междисциплинарных задач основан на раздельном решении систем уравнений для каждой подзадачи и требует реализации обмена данными вычислений между подзадачами через заданный интервал времени [3, 13] с помощью итерационных процедур, либо синхронизация осуществляется напрямую. Такой подход реализован в известных коммерческих продуктах, таких, как ANSYS, Flow Vision, Abacus, CCM+, SolidWorks, LS-Dyna, Sysnoise NASTRAN, OpenFOAM и FEStudio [14].

### **3. Физическая модель**

В данной работе реализуется полностью связанная неунифицированная схема решения аэроупругой задачи, применительно к моделированию в динамической системе «газ-ротор-статор взаимодействия» на примере экспериментальной ступени компрессора.

Рассмотрены два домена: входной направляющий аппарат (ВНА) и сам ротор. Домен ВНА стационарен, домен ротора вращается с угловой скоростью 2880 об/мин. Производится учет взаимовлияния газодинамического потока и деформирования лопатки ротора. Трехмерная расчетная модель представлена на рисунке 1. Рассматривается сектор, представляющий собой 1/12 часть конструкции. Сектор ограничен плоскостями, на которых записываются условия симметрии. Рассматривается течение идеального газа с заданными свойствами; химические процессы не учитываются; поток однофазный;

расчеты проведены без учета гравитации; стенки конструкции не поглощают и не выделяют тепло, шероховатые; коэффициенты теплоемкости не зависят от абсолютной температуры.

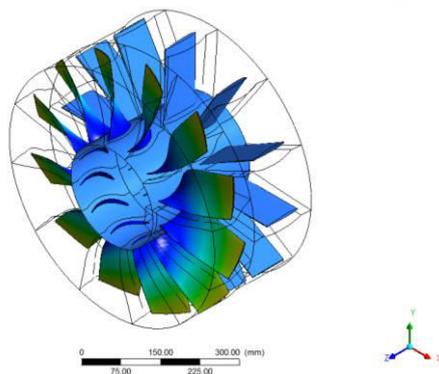


Рисунок 1 – Трехмерная расчетная модель компрессора

#### 4. Математическая модель

В соответствии с выбранной физической используется математическая модель, включающая в себя две подмодели. Подмодель газодинамики базируется на законах сохранения массы, импульса, энергии, уравнении состояния совершенного сжимаемого газа и замыкается начальными и граничными условиями. Граничные условия для газодинамики представлены на рисунке 2а. Математическая подмодель для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) записывается следующим образом [15, 16]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t), \quad (1)$$

где  $m$  – матрица масс;  $c$  – матрица демпфирования;  $k$  – матрица жесткости;  $F(t)$  – вектор нагрузки;  $x$  – перемещения.

В любой момент времени эти уравнения можно рассматривать, как набор статических уравнений равновесия, которые также учитывают силы инерции и демпфирования. Для решения этих уравнений используется интегрирование по времени методом Newmark [15, 16]. Приращение между последовательными моментами времени, шаг интегрирования, рассчитывается. Граничные условия для конструкции представлены на рисунке 2б.

Затем были разработаны твердотельные и сеточные модели конструкции и газодинамической части. Количество элементов сеточной модели газодинамического тракта ротора составило 56482 узлов и 51750 элементов; газодинамического тракта статора – 51863 узлов и 47490 элементов; конструкции – 7728 узлов и 3378 элементов.

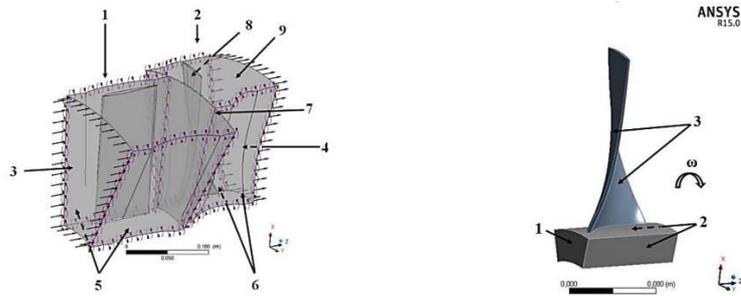
#### 5. Проведение вычислительных экспериментов

Решение отыскивается итерационным способом. Два решателя – Transient Structural (нестационарная механика, метод конечного элемента) и CFX Transient (газодинамика, метод конечного объема) объединены передачей данных. Блок-схема такого решения представлена в [11].

Расчеты проведены в системе компьютерного инженерного анализа ANSYS 15.0 с использованием мощностей высокопроизводительного вычислительного комплекса ПНИПУ. Продолжительность расчета составляет в среднем 4 часа на 16 ядрах «IntelXeon E5-2680».

#### 6. Результаты

В результате проведенных вычислительных экспериментов в двухсторонней FSI (2FSI) постановке удалось выявить зависимость величины компонент НДС лопатки от физико-механических характеристик материала.



1 – домен статора; 2 – домен ротора; 3 – вход; 4 – выход; 5 – симметрия домена статора; 6 – симметрия домена ротора; 7- интерфейс между доменами; 8 – интерфейс «газ-конструкция» (подвижная сетка лопатки ротора); 9 – подвижная сетка зазора в домене ротора

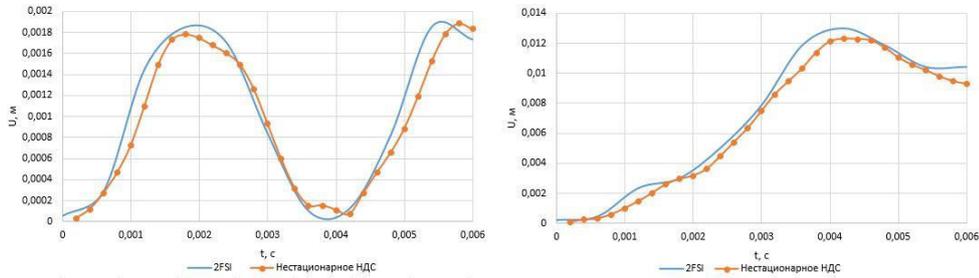
1 – запрет перемещений по нормали к поверхности замка лопатки; 2 – симметрия; 3 – интерфейс «конструкция – газ»

а

б

Рисунок 2 – Граничные условия: а – для газодинамического расчета; б – для расчета НДС

Эффект взаимовлияния в динамической системе «газ-конструкция» в большей степени проявляется при низких модулях упругости материала. Результаты представлены на рисунке 3.



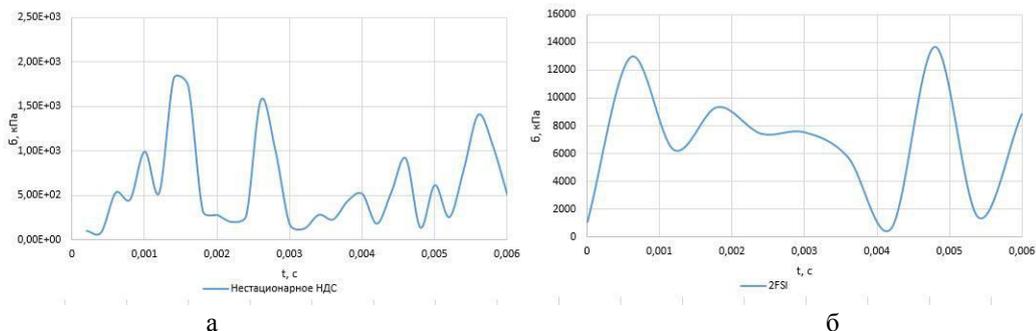
а

б

Рисунок 3 – Полные перемещения в точке лопатки: а –  $E=2 \cdot 10^{11}$  Па; б –  $E=2 \cdot 10^{10}$  Па.

Учет динамики системы «газ-конструкция» показывает усиление низкочастотных колебаний лопатки (рисунок 4).

Взаимовлияние в рамках модели 2FSI усиливается при приближении к критическим частотам. На рисунке 5 представлены зависимости перемещений вдоль оси OX при сравнении двух подходов: 2FSI и нестационарного НДС (без FSI) для различных модулей упругости материала лопатки. Для расчета при модуле упругости  $E=2 \cdot 10^{11}$  Па критической является частота 1013 рад/с; при модуле упругости  $E=1 \cdot 10^{11}$  Па критической является частота вращения 716,88 рад/с. Аналогичная картина наблюдается вдоль осей OY и OZ.



а

б

Рисунок 4 – Напряжения по Мизесу: а – несвязанный нестационарный расчет НДС; б – расчет в2FSI постановке

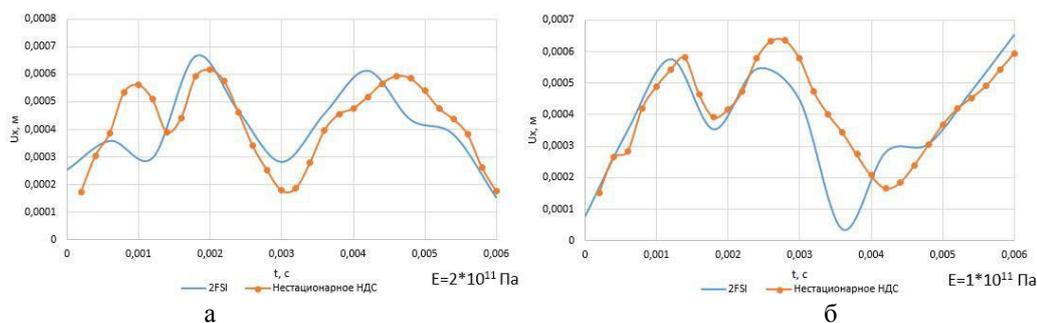


Рисунок 5 – Влияние учета взаимодействия в системе «газ-конструкция»: а – перемещения при  $E=2 \cdot 10^{11}$  Па, б – перемещения при  $E=1 \cdot 10^{11}$  Па

### Литература

1. Мехоношина Е.В., Модорский В.Я. Разработка методики численного моделирования аэроупругой работы компрессора// - Казань: Научно-технический вестник Поволжья. 2014 г. -№5 – С.264-268.
2. Модорский В.Я., Соколкин Ю.В. Газоупругие процессы в энергетических установках// – М. Наука, 2007. – 176 с.
3. Копысов С.П., Тонков Л.Е., Чернова А.А. Двухстороннее связывание при моделировании взаимодействия сверхзвукового потока и деформируемой пластины. Сравнение численных схем и результатов эксперимента// Вычисл. мех. сплош. сред. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 78-85.
4. Амарантов Г.Н., Егоров М.Ю., Егоров С.М., Егоров Д.М., Некрасов В.И. Численное моделирование внутрикамерных процессов при выходе на режим работы ракетного двигателя твердого топлива// Вычисл. мех. сплош. сред. – 2010. – Т. 3, № 4. – С. 5-17.
5. Ганеева М.С., Моисеева В.Е., Скворцова З.В. Нелинейный изгиб и устойчивость эллипсоидальной оболочки, взаимодействующей с жидкостью// Вычисл. мех. сплош. сред. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 32-40.
6. Арсентьев Т.П.// Автореферат диссертации «Колебания крыла в сверхзвуковом потоке газа». – 2009. – 59 с.
7. Blasius H.// Über Schwingungserscheinungen an Einholmigen Unterflügeln. Z. Flugtech. u. Motorluftschif. – 16 (1925). – P. 39—42.
8. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек// – М. Наука, 1972. – 432 с.
9. Горшков А.Г., Морозов В.И., Пономарев А.Т., Шклярчук Ф.Н. Аэрогидроупругость конструкций// – М.: Физматлит, 2000. – 592 с.
10. Xiangying Chen, Ge-Cheng Zha, Ming-Ta Yang. Numerical simulation of 3-D wing flutter with fully coupled fluid–structural interaction// Computers & Fluids. – 36 (2007). – P. 856–867.
11. Jianping Zhang, Liang Guo, Helen Wu, Aixi Zhou, Danmei Hu, Jianxing Ren. The influence of wind shear on vibration of geometrically nonlinear wind turbine blade under fluid–structure interaction// Ocean Engineering. – 84 (2014). – P. 14–19.
12. DONG Hefeng, WANG Chenxi, LI Shaobin, SONG Xi Zhen. Numerical Research on Segmented Flexible Airfoils Considering Fluid-structure Interaction// Procedia Engineering. – 99 ( 2015 ). – P. 57 – 66.
13. Farhat C., Lesoinne M. Two efficient staggered algorithms for the serial and parallel solution of three-dimensional nonlinear transient aeroelastic problems // Comput. Method. Appl. M. – 2000. – V. 182, N. 3-4. – P. 499-515.
14. Копысов С.П., Кузьмин И.М., Рычков В.Н., Тонков Л.Е. Разделенный подход при решении связанных задач FSI на гибридных вычислительных системах// Труды международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2015) – Екатеринбург: Урфу им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. С.415-419.
15. ANSYS Structural Analysis Guide, Release 15.0.
16. Erke Wang, Thomas Nelson. Structural Dynamic Capabilities of ANSYS// – Nonlinear Analysis Using ANSYS - The University Of Maine, 2015.