

О СДВИГЕ ФАЗ ВОЛН НА ГРАНИЦЕ ДВУХ СРЕД

Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

Аннотация

Статья посвящена обзору междисциплинарных задач и численному моделированию $2FSI$ процессов в системе «газ–ротор–статор» применительно к экспериментальной ступени компрессора. Разработаны физическая, твердотельная и сеточная модели. Проведён $2FSI$ расчёт по оценке взаимовлияния газодинамического потока и деформируемой лопатки ротора. Обсуждаются полученные результаты. Важным результатом является обнаружение в ходе вычислительного эксперимента сдвига фаз колебаний между статической и динамической составляющей давления в оптически прозрачной среде и сдвига фаз колебаний давления в оптически прозрачной среде и перемещений в оптически непрозрачной среде.

Ключевые слова: междисциплинарный расчёт, экспериментальная ступень компрессора, сдвиг фаз, оптическая среда.

Цитирование: Мехоношина, Е.В. О сдвиге фаз волн на границе двух сред / Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 385-391.

Введение

Процессы отражения и пропускания волн в сплошных оптически прозрачных и непрозрачных средах связаны с явлениями, имеющими место на границе. Полное отражение волн возможно, если граница двух сред оптически неподвижна. Процесс изменится, если допустить подвижность границы. Одним из факторов, влияющих на подвижность границы, является деформируемость. В свою очередь, деформируемость зависит от физико-механических характеристик материала и процессов нагружения со стороны оптически непрозрачной среды. Аналогом таких явлений можно в первом приближении считать явления аэроупругости. Например, волновые процессы в лопатках турбомшины в потоке газа. Про это понятно, что частотный диапазон рабочих процессов может быть смещён за счёт применения иных материалов и изменения геометрических характеристик конструкции. Результаты исследований в этом направлении можно применить при проектировании газоперекачивающих агрегатов (ГПА).

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 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. Необходимо также учёт процессов в магнитных подвесах. Кроме того, важным фактором, влияющим на вибрации, являются процессы в лабиринтных уплотнениях и в газодинамическом тракте.

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

В целом, учёт 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 твёрдом топливе, процессах флаттера крыла самолёта, аэродинамики паруса или парашюта, срабатывании автомобильной подушки безопасности и пр. [2, 3, 4, 5].

Газ в такой постановке можно рассматривать как оптически прозрачную среду, а конструкцию – как оптически непрозрачную.

1. Обзор

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

К вопросам аэрогидроупругости с тех пор обращалось много исследователей. В 1972 году А.С. Вольмир описал вынужденные колебания пластины, подвергнутой действию периодически изменяющейся поперечной нагрузки [8]. В [9] подробно

рассматривается проблема аэрогидроупругости и её 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 энергомаховых характеристик, что приводит к тому, что нагрузки возрастают, а масса конструкций уменьшается, при этом снижается жёсткость конструкций. В такой постановке всё чаще могут возникать непрогнозируемые эффекты типа «флаттер». Эти вопросы исследуются в работах [2]. Авторы рассматривают газопругий подход к расчёту 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] трёх стран: Китая, Австралии и Америки. Свои численные расчёты авторы проводили с учётом взаимовлияния потока газа и конструкции в прикладном программном пакете ANSYS. Учёные отмечают, что эффект от данного взаимодействия существен, и его нельзя не учитывать [11]. О взаимодействии газодинамического потока и конструкции с профилем NASA0012 пишут исследователи из Китая [12]. Наряду с [2], подчёркивается, 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 расчёт аэродинамики и прочности является сложной задачей из-за различий математических моделей, методов решения, динамики расчётных областей и подходов к дискретизации уравнений.

Существуют два варианта связывания уравнений динамики деформирования твёрдого 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 сопряжённых 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, FlowVision, Abacus, CCM+, SolidWorks, LS-Dyna, Sysnoise NASTRAN, OpenFOAM и FESstudio [14].

2. 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 постоянной угловой скоростью. Производится учёт взаимовлияния газодинамического потока и деформирования лопатки ротора. Трёхмерная расчётная модель представлена на рис. 1.

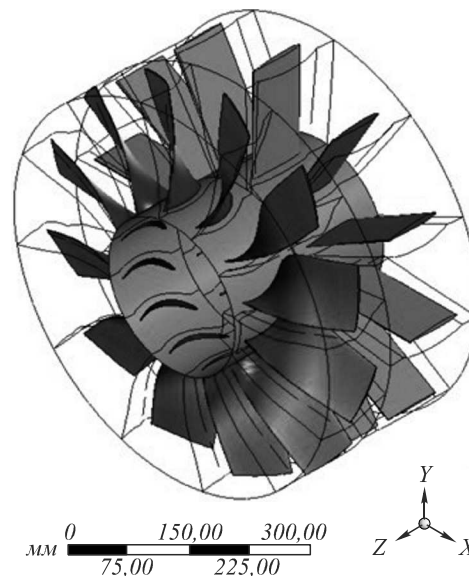


Рис. 1. Трёхмерная расчётная модель компрессора

Рассматривается сектор, представляющий собой 1/12 часть конструкции. Сектор ограничен плоскостями, на которых записываются условия симметрии, т.о. не учитываются эффекты, связанные с влиянием гравитации на напряжённо-деформированное состояние (НДС). Рассматривается течение идеального газа с заданными свойствами, что для сравнительно низких давлений, температур и дозвуковых скоростей потока приемлемо. Химические процессы не учитываются; поток однофазный; стенки конструкции не поглощают и не выделяют тепло, шероховатые. Не учитывается взаимовлияние ступеней компрессора, влияние вибраций подшипников рабочего вала на вибрации лопаток. Данную физическую модель можно рассматривать как первоначальную, этапную. На последующих этапах предполагается учесть взаимовлияние ступеней и влияние вибраций в подшипниках, а также влияние гравитации.

3. 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 рис. 2.

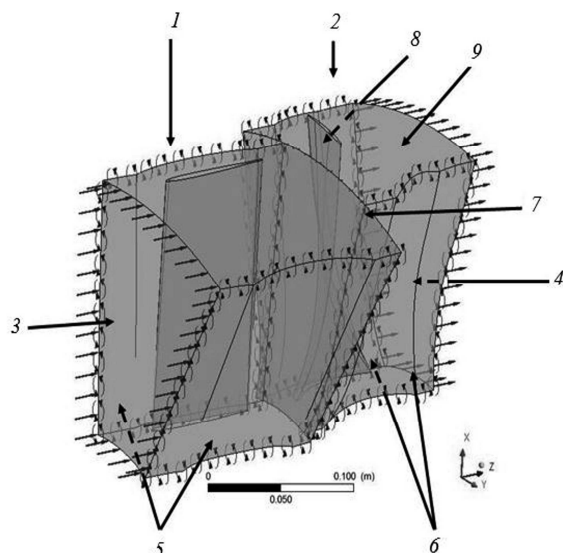


Рис. 2. Граничные условия для газодинамического расчёта. 1 – домен статора; 2 – домен ротора; 3 – вход; 4 – выход; 5 – симметрия домена статора; 6 – симметрия домена ротора; 7 – интерфейс между доменами; 8 – интерфейс «газ–конструкция» (подвижная сетка лопатки ротора); 9 – подвижная сетка зазора в домене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

Математическая подмодель для оценки компонент НДС записывается следующим образом [15, 16]:

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

где m – матрица масс; c – матрица демпфирования; k – матрица жёсткости; $F(t)$ – 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 рис. 3.

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

4. 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].

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

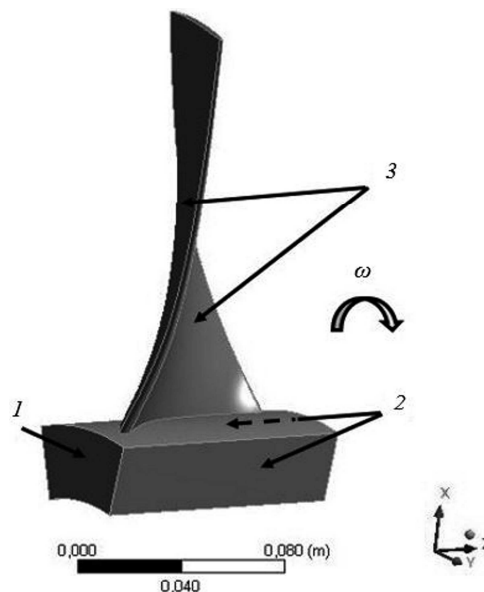


Рис. 3. Граничные условия для расчёта компонент НДС. 1 – запрет перемещений по нормали к поверхности замка лопатки; 2 – симметрия; 3 – интерфейс «конструкция–газ»

5. Результаты

В результате проведённых вычислительных экспериментов в двухсторонней *FSI* (*2FSI*) постановке удалось выявить зависимость величины компонент НДС лопатки от физико-механических характеристик материала. Расчёты проведены для скорости вращения 2880 об/мин.

Эффект взаимовлияния в динамической системе «газ–конструкция» в большей степени проявляется при низких модулях упругости материала. Результаты представлены на рис. 4а и б.

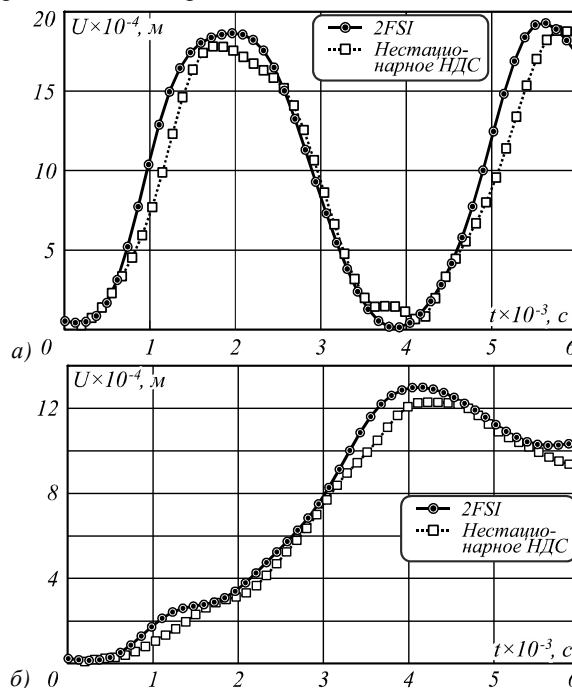


Рис. 4. Полные перемещения в контрольной точке на верхней кромке лопатки: $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па (а); $E = 2 \cdot 10^{10}$ Па (б)

На рис. 5а и б представлена разница в двух подходах – 2FSI и нестационарного расчёта компонент на-

пряжённо-деформированного состояния для двух модулей упругости материала.

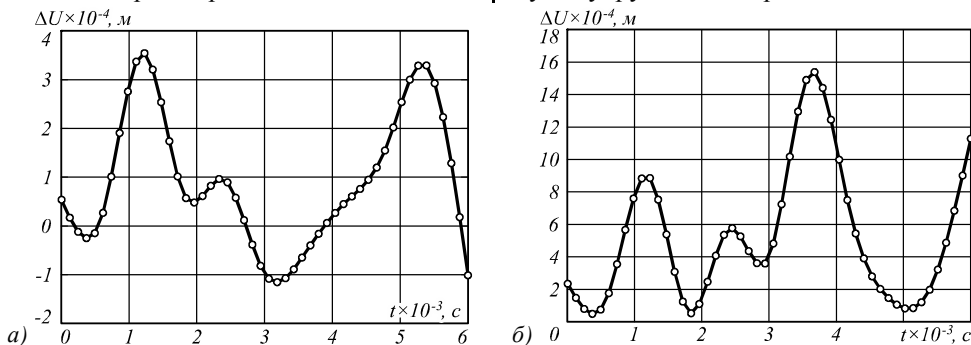


Рис. 5. Разница перемещений в контрольной точке на верхней кромке лопатки: $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па (а); $E = 2 \cdot 10^{10}$ Па (б)

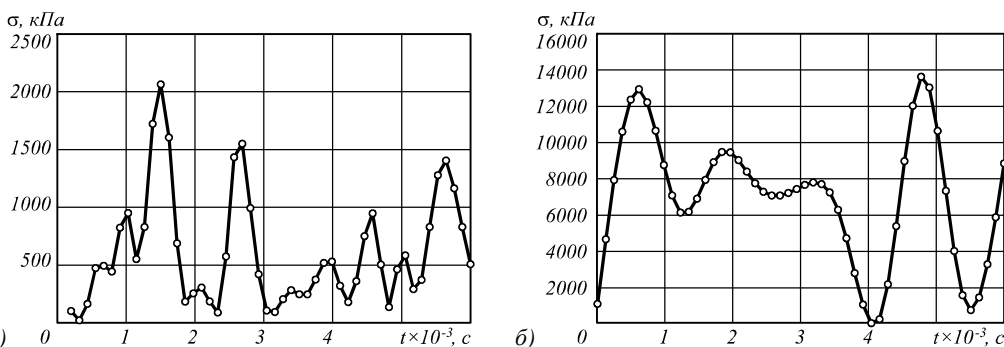


Рис. 6. Напряжения по Мизесу: несвязанный нестационарный расчёт НДС (а); расчёт в 2FSI постановке (б)

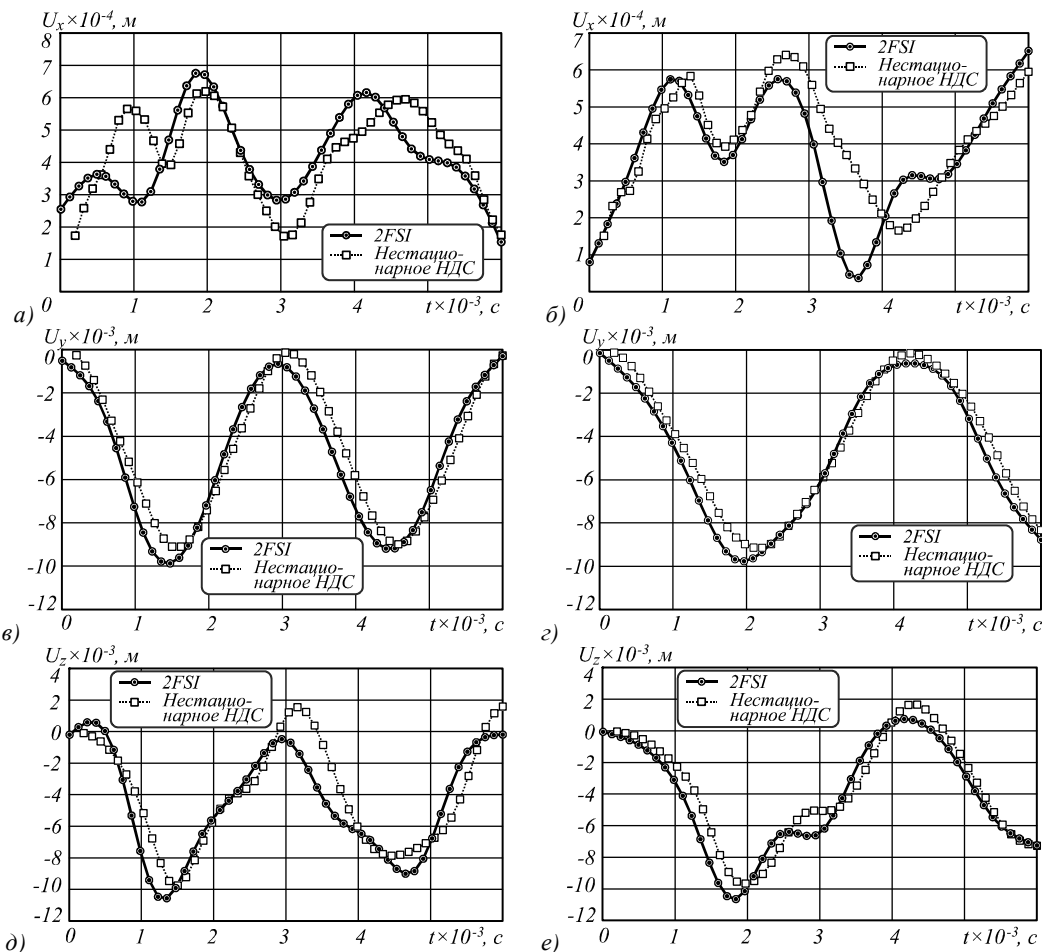


Рис. 7. Влияние учёта взаимодействия в системе «газ–конструкция»: перемещения при $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па (а, в, д); перемещения при $E = 1 \cdot 10^{11}$ Па (б, г, е)

Учёт динамики системы «газ–конструкция» показывает усиление низкочастотных колебаний лопатки (рис. 6а-б).

Взаимовлияние в рамках модели 2FSI усиливается при приближении к критическим частотам. На рис. 7 а-е представлены зависимости перемещений контрольной точки на верхней кромке лопатки вдоль осей OX , OY и OZ при сравнении двух подходов: 2FSI и нестационарного НДС (без FSI) для различных модулей упругости материала лопатки. Для расчёта 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.

Наблюдается сдвиг фаз колебаний перемещения и давления в 2FSI постановке (рис. 8 а и б) и сдвиг фаз, составляющий около $3/10\pi$ между колебаниями перемещений в контрольной точке на верхней кромке лопатки при нестационарном НДС и при 2FSI постановке (рис. 8а).

Обнаружен сдвиг фаз между полным динамическим и статическим давлением в 2FSI постановке, который составляет $\pi/2$ (рис. 9а – полное динамическое давление, рис. 9б – полное статическое давление). Сдвиг фаз между волнами в газе и конструкции вносит скоростной напор.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российской государственной научной фонды (проект №14-19-00877).

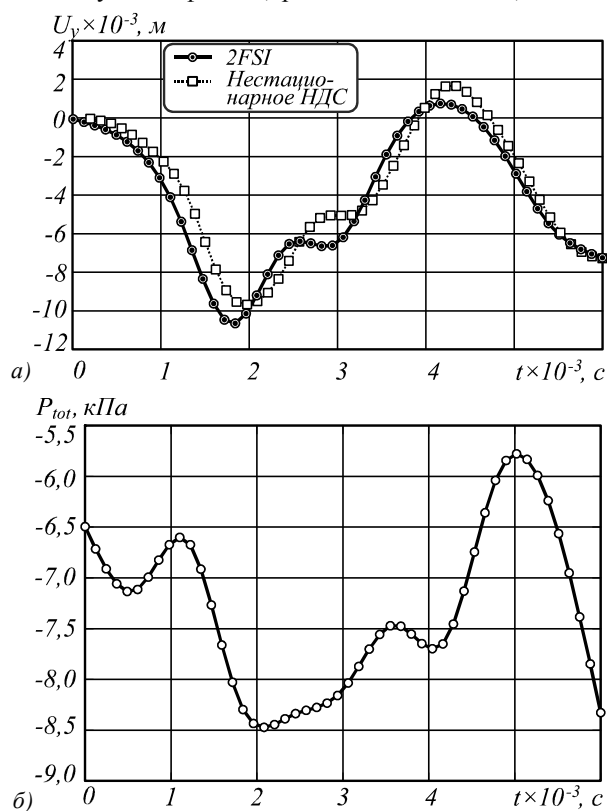


Рис. 8. а – перемещения в контрольной точке на верхней кромке лопатки по оси OY ; б – избыточное динамическое давление на точке лопатки

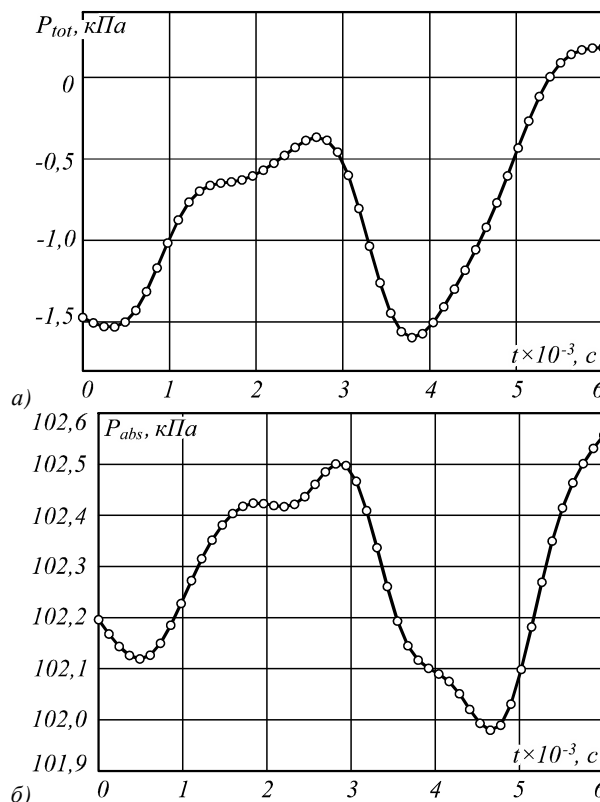


Рис. 9. Полное динамическое давление перемещения (а), полное статическое давление (б)

Литература

1. Мехоношина, Е.В. Разработка методики численного моделирования аэроупругой работы компрессора / Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 264-268.
2. Модорский, В.Я. Газоупругие процессы в энергетических установках/ В.Я. Модорский, Ю.В. Соколкин; под ред. Ю.В. Соколкина. – М.: Наука, 2007. – 176 с.
3. Копысов, С.П. Двухстороннее связывание при моделировании взаимодействия сверхзвукового потока и деформируемой пластины. Сравнение численных схем и результатов эксперимента / С.П. Копысов, Л.Е. Тонков, А.А. Чернова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 78-85.
4. Амарантов, Г.Н. Численное моделирование внутрикамерных процессов при выходе на режим работы ракетного двигателя твёрдого топлива / Г.Н. Амарантов, М.Ю. Егоров, С.М. Егоров, Д.М. Егоров, В.И. Некрасов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 5-17.
5. Ганеева, М.С. Нелинейный изгиб и устойчивость эллипсоидальной оболочки, взаимодействующей с жидкостью / М.С. Ганеева, В.Е. Моисеева, З.В. Скворцова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 32-40.
6. Арсентьев, Т.П. Колебания крыла в сверхзвуковом потоке газа [Электронный ресурс] : автореф. дис. ... канд. ф.-м. наук. Санкт-петербургский гос. университет, СПб., 2009 – URL: <http://www.dissercat.com/content/kolebaniya-kryla-v-sverkhzvukovom-potoke-gaza-0> (дата обращения 10.05.2015).
7. Blasius, H. Über Schwingungserscheinungen an Einholmigen Unterflügeln / H. Blasius // Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt. – 1925. – Vol. 16. – P. 39-42.

8. **Вольмир, А.С.** Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А.С. Вольмир; под ред. И.Г. Кильдибекова. – М.: Наука, 1972. – 432 с.
9. Аэрогидроупругость конструкций / А.Г. Горшков, В.И. Морозов, А.Т. Пономарев, Ф.Н. Шклярчук. – М.: Физматлит, 2000. – 592 с.
10. **Xiangying, Ch.** Numerical simulation of 3-D wing flutter with fully coupled fluid–structure interaction / Ch. Xiangying, Zh. Ge-Cheng, Ya. Ming-Ta // *Computers & Fluids*. – 2007. – Vol. 36. – P. 856–867. – ISSN 0045-7930.
11. The influence of wind shear on vibration of geometrically nonlinear wind turbine blade under fluid–structure interaction / J. Zhang, L. Guo, H. Wu, A. Zhou, D. Hu, J. Ren // *Ocean Engineering*. – 2014. – Vol. 84. – P. 14–19. – ISSN 0029-8018.
12. **Hefeng, D.** Numerical Research on Segmented Flexible Airfoils Considering Fluid-structure Interaction / D. Hefeng, W. Chenxi, L. Shaobin, S. Xi Zhen // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 99. – P. 57–66. – ISSN 1877-7058.
13. **Farhat, C.** Two efficient staggered algorithms for the serial and parallel solution of three-dimensional nonlinear transient aeroelastic problems / C. Farhat, M. Lesoinne // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2000. – V. 182(3-4). – P. 499-515. – ISSN 0045-7825.
14. **Копысов, С.П.** Разделенный подход при решении связанных задач FSI на гибридных вычислительных системах / С.П. Копысов, И.М. Кузьмин, В.Н. Рычков, Л.Е. Тонков // 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 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения 15.05.2015).
16. Wang, E. Structural Dynamic Capabilities of ANSYS / Erke Wang, Thomas Nelson [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <http://easc.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2002-Int-ANSYS-Conf-200.PDF> (дата обращения 06.05.2015).
- sults Experiment [In Russian]. *Computational Continuum Mechanics* 2013; 6(1): 78-85.
- [4] Amarantov GN, Egorov MYu, Egorov SM, Egorov DM, Nekrasov VI. Numerical modeling of intra chamber processes at an exit to an operating mode of the rocket engine of solid fuel [In Russian]. *Computational Continuum Mechanics* 2010; 3(3): 5-17.
- [5] Ganeev MS, Moiseyev VE, Skvortsova ZV. A nonlinear bend and stability of the ellipsoidal cover interacting from Liquid [In Russian]. *Computational Continuum Mechanics* 2011; 4(3): 32-40.
- [6] Arsentiev TP. The Abstract of the thesis "Fluctuations of a wing in a supersonic stream of gas" [In Russian]. : PhD thesis abstract physical and mathematical science. St. Petersburg State. University, St. Petersburg., 2009– Source: <<http://www.disserscat.com/content/kolebaniya-kryla-v-sverkhzvukovom-potoke-gaza-0>>
- [7] Blasius H. Über Schwingungserscheinungen an Einholmigen Unterflügeln. *Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt* 1925; 16: 39-42.
- [8] Volmir AS Nonlinear dynamics of plates and Covers [In Russian]. Ed by Kildibekov IG. Moscow: “Nauka” Publisher, 1972.
- [9] Gorshkov AG, Morozov VI, Ponomarev AT, Shklyarchuk FN. Aero hydroelasticity of designs [In Russian]. Moscow: “Fizmatlit” Publisher, 2000.
- [10] Xiangying Ch, Ge-Cheng Zh, Ming-Ta Ya. Numerical simulation of 3-D wing flutter with fully coupled fluid–structure interaction. *Computers & Fluids* 2007; 36: 856–867.
- [11] Jianping Z, Liang G, Helen W, Aixi Zh, Danmei H, Jianxing R. The influence of wind shear on vibration of geometrically nonlinear wind turbine blade under fluid–structure interaction. *Ocean Engineering*. 2014; 84: 14-19.
- [12] Hefeng D, Chenxi W, Shaobin L, Zhen SXI. Numerical Research on Segmented Flexible Airfoils Considering Fluid-structure Interaction. *Procedia Engineering*. 2015; 99: 57-66.
- [13] Farhat C, Lesoinne M. Two efficient staggered algorithms for the serial and parallel solution of three-dimensional nonlinear transient aeroelastic problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2000; 182(3-4): 499-515.
- [14] Kopysov SP, Kuzmin IM, Rychkov VN, Tonkov LE. The divided approach at the solution of the connected problems of FSI on hybrid computing systems. Works of the international scientific conference «Parallel computing technologies (PAVT '2015)» [In Russian]. Yekaterinburg: Urfa of the first President of Russia B. N. Yeltsin. 2015; 415-419.
- [15] ANSYS Structural Analysis Guide, Release 15.0. Source: <<http://www.ansys.com/>>.
- [16] Wang E, Nelson T. Structural Dynamic Capabilities of ANSYS. Source: <<http://easc.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2002-Int-ANSYS-Conf-200.PDF>>.

References

- [1] Mekhonoshina EV, Modorsky VYa. Development of a technique of numerical modeling of the aeroelastic work of Compressor [In Russian]. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region* 2014; 5: 264-268.
- [2] Modorsky VYa, Sokolkin YuV. Gas-elastic processes in power installations [In Russian]. Ed by YuV Sokolkin. Moscow: “Nauka” Publisher, 2007.
- [3] Kopysov SP, Tonkov LE, Chernova AA. Bilateral binding when modeling interaction of a supersonic stream and deformable plate. Comparison of numerical schemes and re-

ON A PHASE-SHIFT OF WAVES AT THE MEDIUM INTERFACE

E.V. Mekhonoshina, V.Ya. Modorskii

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract

In this article we overview interdisciplinary problems and perform the numerical modeling of a two-way fluid–structure interaction (2FSI) of processes in a gas-rotor-stator system in relation to a prototype compressor stage. Physical, solid-state and mesh-based models are developed. By calculating the 2FSI, we evaluate the interference of a gas-dynamic stream and a deformable rotor blade. The obtained results are discussed. An important finding of the numerical experiment is that a phase-shift of oscillations between the static and dynamic pressure components in optically transparent environment and a phase shift of pressure oscillations in an optically transparent medium and movement in an optically opaque medium are discovered.

Keywords: interdisciplinary calculation, experimental compressor stage, phase-shift, optical medium.

Citation: Mekhonoshina EV, Modorskiy VYa. On a phase-shift of waves at the medium interface 2015; 39(3): 385-91.

Сведения об авторах

Мехоношина Евгения Викторовна, 1991 года рождения, в 2013 году окончила с отличием Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ) по специальности «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы», работает инженером в Центре высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ. Область научных интересов: аэроупругость, вычислительный эксперимент, вибрации.

E-mail: mevpstu@gmail.com.

Evgeniia Victorovna Mekhonoshina (b. 1991) graduated from Perm National Research Polytechnic University (PNRPU) in "Aviation Devices and Measuring Computer Systems" with honors. Currently she works as the engineer in the Center of the High-Performance Computing Systems PNRPU. Research interests are aeroelasticity, computing experiment, vibrations.

Модорский Владимир Яковлевич, 1964 года рождения, в 1987 году окончил с отличием Пермский политехнический институт (ППИ, ныне – Пермский национальный исследовательский политехнический университет – ПНИПУ) по специальности «Производство летательных аппаратов», работает профессором ПНИПУ, директором Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ. Область научных интересов: аэроупругость, вычислительный эксперимент, вибрации, кавитация.

E-mail: modorsky@pstu.ru.

Vladimir Yakovlevich Modorskii (b. 1964) graduated from Perm Polytechnic Institute (PPI, today – Perm National Research Polytechnic University (PNRPU) in "Production of Aircraft" with honors. Currently he works as professor of PNRPU, the director of the Center of the High-Performance Computing Systems PNRPU. Research interests are aeroelasticity, computing experiment, vibrations, cavitation.

*Поступила в редакцию 22 июня 2015 г.
Окончательный вариант – 10 июля 2015 г.*