

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПЛАСТИНЫ В НАБЕГАЮЩЕМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

С.В. Погудалина^{1,3}, С.А. Вальгер², Н. Н. Федорова^{1,2,3}

¹Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

²Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск

³Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича, г. Новосибирск

Сопряженные физические процессы, в которых движение воздушной среды оказывает влияние на поведение деформируемых объектов (Fluid Structure Interaction, FSI) являются ключевым элементом во многих инженерных задачах в авиации и строительстве. Если деформация объекта достаточно велика, необходимо учитывать обратное влияние деформированного объекта на внешнее течение (2FSI). Для исследования задачи могут быть использованы как теоретические [1], так и расчетные методы [2].

В работе проведено исследование сопряженной задачи о взаимодействии упругой конструкции с внешней воздушной средой. В предыдущих работах [3,4] с целью отработки методики решалась модельная 2D задача, в которой пластина в начальный момент времени деформировалась под действием приложенного давления. В [5] методика использована для моделирования колебания пластины под действием периодического внешнего потока.

В настоящей работе решается 3D задача о колебании пластины из пенопласта под воздействием внешнего потока воздуха движущегося со скоростью $U = 5$ м/с ($Re_b = 10271$, где b - характерный размер поперечного сечения пластины). Эта задача была экспериментально исследована на кафедре АГД НГТУ. Эксперимент проводился в учебной аэродинамической трубе СС-19 [6,7]. Для пластины квадратного сечения при $Re = 10^4 \div 10^6$ получены поперечные колебания с числами Струхала $Sh = 0.12 \div 0.14$. Для расчета использован ПК ANSYS, на основе технологии решения сопряженных задач через оболочку Workbench.

Исходная геометрия (рис.1,а) представляет собой пространственный канал с размерами $3.34 \times 2.83 \times 0.8$ м. Внутри канала расположена подложка 1.2×0.8 м, на которой на расстоянии 0.6 м от входа одним концом жестко закреплен параллелепипед (упругая пластина) с размерами $0.28 \times 0.03 \times 0.03$ м. Стрелка на рисунке указывает направление набегающего потока воздуха.

Численное моделирование течения воздуха в канале выполнено на основе трехмерных нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье - Стокса. Задача решена в турбулентной постановке. Для замыкания использовали $k-\omega$ SST модель турбулентности. Интенсивность турбулентных пульсаций на входе в расчетную область составляла 1%, в качестве характерного масштаба турбулентных пульсаций принята высота пластины $h = 0.28$ м. Расчеты выполнены для атмосферного воздуха с постоянными плотностью $\rho = 1.225$ кг/м³ и вязкостью $\mu = 1.789 \cdot 10^{-5}$ н·с/м². Для расчета использована конечно-объемная схема, основанная на решении уравнения для давления, а так же схемы второго порядка для аппроксимации производных по пространственным и временной переменным.

Процессы в твердом теле описываются нестационарными уравнениями теории упругости, условием совместности деформаций и законом Гука. В качестве материала пластины использован модельный изотропный материал со свойствами, близкими к пе-

нопласту с плотностью $\rho=40 \text{ кг/м}^3$, модулем упругости $E=12.7 \times 10^6 \text{ Па}$ и коэффициентом Пуассона $\nu=0.35$. На стенках модели и на подложке принято условие прилипания. На границе упругой пластины и воздуха выполняются условия равенства потоков массы и количества движения. На верхней и боковых границах расчетной области выполняется условие симметрии, обеспечивающее отсутствие потока через эти границы.

Расчет проведен на неструктурированной сетке в воздушной области (рис.1, б) с количеством расчетных ячеек ~ 1.2 млн. На пластине (рис.1, в) построена структурированная сетка с 4480 призматическими ячейками. Сетка изменялась по направлению к подложке и пластине. На границе сопряжения воздушной области и упругого тела сетка неконформная. В процессе расчета выполняется геометрическая адаптация расчетной сетки с учетом деформации пластины.

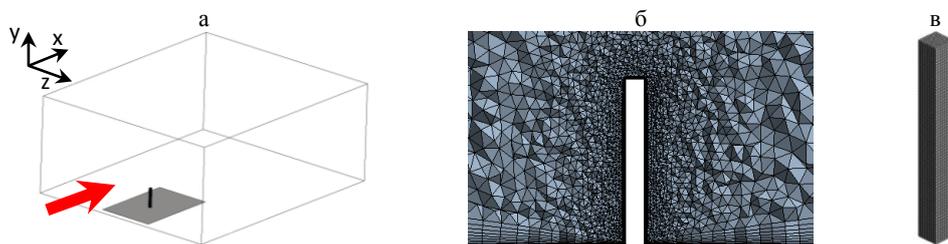


Рис. 1. Расчетная область (а), фрагмент исходной расчетной сетки воздушного потока (б) и сетка на пластине (в)

Расчет был разбит на несколько этапов. На первом этапе проводился гидродинамический расчет в модуле ANSYS Fluent. Моделирование течения вокруг призматического тела выполнено в предположении, что модель абсолютно жесткая. Расчеты выполнены с шагом по времени $t=0.005 \text{ с}$.

Течение на момент времени $t=2.3 \text{ с}$ в окрестности закрепленного на пластине параллелепипеда имеет пространственную вихревую структуру (рис.2). Линии тока представлены на виде сбоку (а) и в изометрии (б). Структура течения совпадает с описанной в [8].

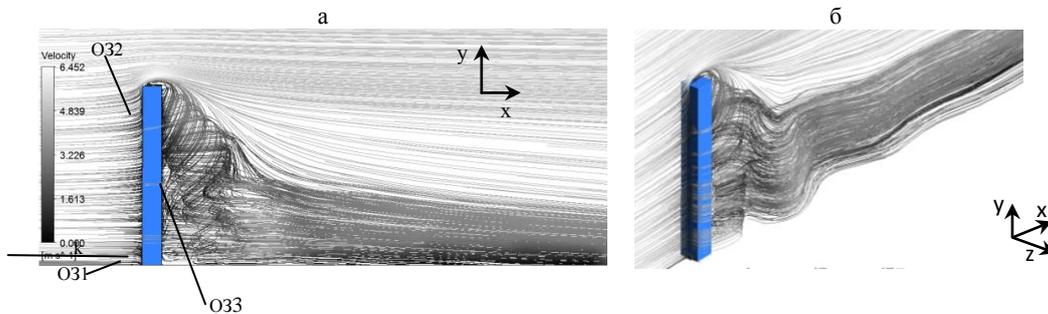


Рис.2. Линии тока в окрестности пластины на момент времени $t=2.3 \text{ с}$. Вид сбоку (а) и в изометрии (б)

В центре фронтальной поверхности параллелепипеда существует вертикальная линия растекания, вблизи которой набегающий поток разделяется и срывается с боковых кромок модели, образуя нестационарные отрывные зоны. Кроме того происходит растекание потока вверх и вниз от точки, показанной линией (к) на рис. 2. При разделении основная часть воздуха уходит вверх и срывается с верхней передней грани параллелепипеда, обтекает отрывную зону O32 на его крышке. Оставшаяся часть потока попадает в отрывную зону O31 перед моделью и уходит по краям в подветренную сторону модели. Позади пластины с момента $t=1.5 \text{ с}$ образуется дорожка Кармана (O33).

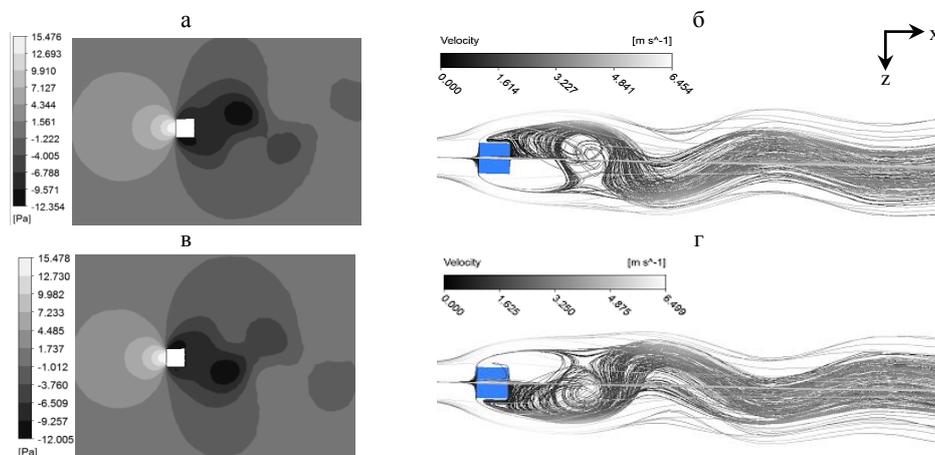


Рис.3. Поле давления (а, в) и линии тока(б, г) на момент времени: 2.3 с (а, б) и 2.39 с (в, г)

На втором этапе проведен совместный (гидродинамический и прочностной) расчет. Численное моделирование выполнено в ANSYS Workbench [9] с использованием технологии двунаправленного сопряжения (2FSI). Для описания движения внешней воздушной среды с помощью метода конечных объемов, используется программный модуль ANSYS CFD (Fluent). Расчет напряжений и деформаций в твердых телах на основе метода КЭ проведено в модуле ANSYS Mechanical Transient Structural. Для организации сопряженного расчета взаимодействия среды и конструкции используется инструмент System Coupling.

На каждом шаге по времени сначала выполняется прочностной расчет. Полученные данные о деформации объекта и скорости его движения передаются в гидродинамический расчет, в котором моделируется течение воздуха в окрестности пластины. Потом передача данных проводится в обратном порядке. Итерации сопряжения повторяются до достижения заданного критерия сходимости.

На рис. 3 представлены поле давления (а, в) и линии тока (б, г) на момент времени $t = 2.3$ с и 2.39 с в сечении $y=0.1$ м. Из рисунка видно, что за пластиной образуются вихри, поочередно срывающиеся с боковых кромок.

На рис. 4,а представлен график зависимости максимальных продольных перемещений пластины Δu от времени t . На графике показана кривая затухания, уравнение которой имеет вид: $u = 0.0014e^{-0.788 t}$. Максимальное отклонение пластины (рис.4 б) составляет $\Delta u_{x \max} = 2.23 \cdot 10^{-3}$ м при $t = 0.01$ с, период колебаний пластины $T = 0.029$ с.

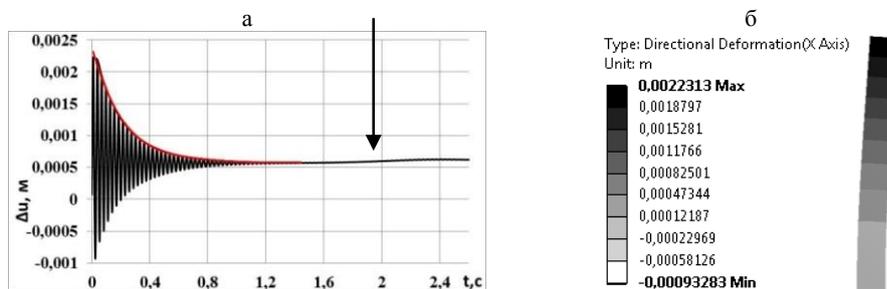


Рис. 4. График зависимости максимальных продольных перемещений пластины от времени (а) и максимальное отклонение пластины (б) на момент времени $t = 0.01$ с

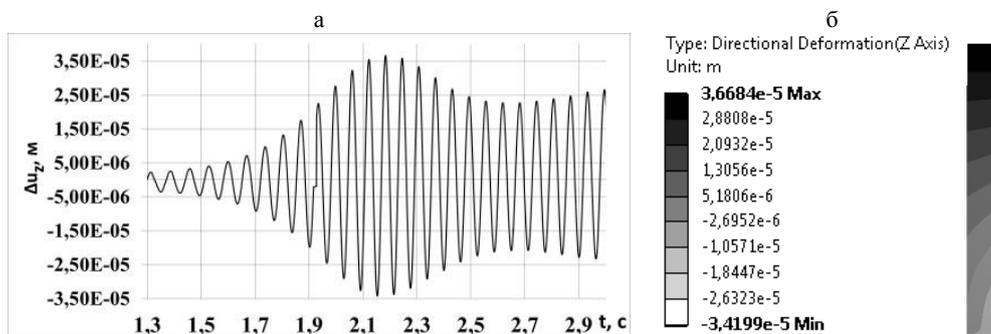


Рис. 5. Максимальные поперечные перемещения пластины в зависимости от времени и максимальное отклонение пластины на момент времени $t = 2.184$ с

Амплитуда поперечных колебаний (рис.5 а) с момента времени $t = 1.5$ с, напротив, нарастает, что связано с поочередным срывом вихрей с боковых кромок пластины. Совокупность отрывающихся в шахматном порядке вихрей, образует вихревую дорожку Кармана. Сход вихрей происходят с постоянным периодом $T=0.071$ с, следовательно на конструкцию действует периодическая возбуждающая сила. Максимальное отклонение пластины по оси z (рис. 5, б) составляет $\Delta u_{z \max} = 3.668 \cdot 10^{-5}$ м на момент времени $t = 2.184$ с.

Стрелка на рис. 4 показывает момент ($t = 2.2$ с) формирования дорожки Кармана с максимальной амплитудой.

Анализ собственных частот и форм колебаний жестко закрепленной с одной стороны пластины, проведенный с использованием модуля Modal Static Structural, позволил получить первые 6 собственных частот колебаний, которые представлены в таблице.

Порядковый номер	1, 2	3,4	5	6
Частота, Гц	34.8	206.9	281.8	505.4

Поскольку пластина имеет квадратное сечение, первая и вторая частоты кратные и имеют по две подобные формы – в направлениях x и z . Для каждой из частот получены формы колебаний конструкций, показанные на рис. 6.

Результаты расчета показали, что в первый период времени пластина совершает продольные колебания с первой собственной частотой ($f_x = 34.48$ Гц), амплитуда которых быстро затухает. В следующий временной период пластина совершает поперечные колебания с частотой ($f_z = 14,085$ Гц), вызванные срывом вихрей в дорожке Кармана. Угрозы возникновения резонанса при скорости набегающего потока 5 м/с для этой модели не возникает.

На основе технологии двустороннего взаимодействия потоков (2FSI), реализованной в ПК ANSYS, отлажена методология проведения связанных расчетов. Проведена верификация математической модели, в частности показано, что число Струхала в численном расчете $Sh = 0.09$ отличается от экспериментального значения ($Sh = 0.12 \div 0.14$), что может быть связано с недостаточным сеточным разрешением [10]. В дальнейшем предполагается выполнить расчеты на более подробной сетке. С целью исследования резонанса, будут изучены другие направления скорости и более высокие амплитуды.

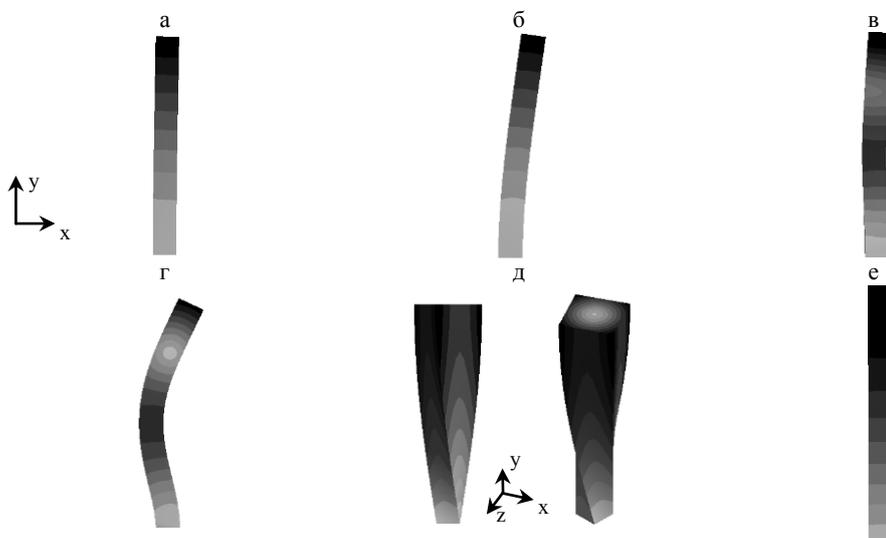


Рис. 6. Формы колебаний при разных частотах 34.765 (а, б); 206.94 (в, г); 281.77 (д); 505.38 (е) Гц

Работа выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №15-07-06581-а) и Минобрнауки РФ (проект № 211, ЗАДАНИЕ № 2014/140 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фершинг Г. Основы аэроупругости / пер. с нем. К.Ф. Плита; под редакцией Г.М. Фомина. М.: Машиностроение, 1984. 600с.
2. Веденеев В.В. Численное исследование сверхзвукового флаттера пластины с использованием точной аэродинамической теории // Изв. РАН. МЖГ. 2009. № 2. С. 169–178.
3. Погудалина С. В., Вальгер С.А., Федорова Н. Н./ Моделирование сопряженной задачи о колебании пластины в набегающем воздушном потоке// НПО: труды XVI Всероссийской научно-технической конференции / коллектив авторов; под редакцией К.А. Матвеева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015,с. 642-646.
4. Погудалина С.В., Вальгер С.А., Федорова Н.Н./ Математическое моделирование колебания пластины в воздушной среде // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные вопросы строительства", посвященной 85-летию со дня образования НГАСУ (Сибстрин). - Новосибирск, НГАСУ(Сибстрин), 2015. - С. 268-272
5. Федорова Н.Н., Вальгер С.А./ Моделирование взаимодействия потока воздуха с гибкой пластиной // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 4 (676). С. 118-129.
6. Кураев А. А., Обуховский А. Д., Однорал В. П., Подружин Е. Г., Саленко С. Д. / Аэродинамика: лабораторный практикум для 3–4 курсов ФЛА всех форм обучения// Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008
7. Саленко С. Д., Однорал В. П., Телкова Ю. В./ Промышленная аэродинамика: лабораторный практикум//Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. 41с.
8. Вальгер С.А., Федорова Н.Н., Федоров А.В./ Структура турбулентного отрывного течения в окрестности установленной на пластине призмы с квадратным сечением // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 1. С. 29-42.
9. ANSYS Inc. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com> (Дата обращения: 5.09.2015).
10. Вальгер С.А., Федоров А.В., Федорова Н.Н./ Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent //Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. № 3. С. 27-41.