

А.В. ГРАБОВСКИЙ, к.т.н., с.н.с. каф. ТММиСАПР, НТУ „ХПИ”

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗАННОЙ ЗАДАЧИ АЭРОУПРУГОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

Предложен новый подход к расчету напряженно-деформированного состояния элементов с учетом взаимодействия упругой конструкции с газовым потоком. Он базируется на постановке связанной задачи аэроупругости. Приведены результаты решения тестовой задачи.

Ключевые слова: связанная задача, аэроупругость, напряженно-деформированное состояние, скорость потока, обтекание

Введение. В последние годы встречается все больше работ, в которых авторы критикуют выполнение независимого исследования газодинамического расчета с последующей интерполяцией результатов для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) [1-4]. В свою очередь все большую популярность приобретают связанные задачи, в частности, задачи сопряжения потока газа и деформируемой конструкции. Это связано с необходимостью выполнять более точные исследования различных конструкций, путем согласования получаемых решений на границах подобластей с использованием итерационных алгоритмов. Решение связанных задач аэроупругости (FSI – Fluid-Structure Interaction) является актуальной задачей в современной инженерии, поскольку без учета совместного влияния воздушного потока и деформаций конструкции невозможно получить достаточно точное решение задачи.

Стоит отметить, что очень важным является учет двусторонней связи, поскольку односторонняя не позволит получить удовлетворительный результат, особенно для податливых, в т.ч. – тонкостенных, конструкций.

Цель и задачи исследования. В представленной работе планируется решить связанную задачу аэроупругости на примере податливой панели (щита) от действия потока воздуха. Модель исследуемой конструкции приведена на рис. 1. Вторым этапом решения задачи планируется выполнить несвязанную задачу аэроупругости, определить деформации и силы, после чего оценить степень влияния двухсторонней связи на точность расчета, а также показать, на сколько при этом уменьшатся напряжения и деформации в модели исследуемой конструкции.



Рисунок 1 – Исследуемая конструкция

Анализ существующих методов исследования. Для решения задачи применялся стандартный метод описания области воздуха как вязкого газа, описываемого уравнениями Навье-Стокса (здесь t – время, ρ – плотность воздуха, U – скорость потока, p – давление, h – энтальпия, H – полная энтальпия, τ – тензор вязких напряжений, μ – динамическая вязкость, λ – коэффициент теплопроводности, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, R – газовая постоянная для воздуха, T – абсолютная температура, G – метрический тензор, ∇ – оператор Гамильтона в отсчетной системе координат):

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, & \frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U} + p \mathbf{G} - \boldsymbol{\tau}) = 0, \\ \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} H - \mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau} - \lambda \nabla T) = 0, \\ \boldsymbol{\tau} = \mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \mathbf{G} \nabla \cdot \mathbf{U} \right), & H = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2, \quad h = c_p T, \quad p = \rho R T. \end{cases} \quad (1)$$

Для описания щита как деформируемого тела в случае больших градиентов перемещений используется следующая система уравнений [5]:

$$\begin{cases} \rho \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} = \hat{\nabla} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{f} \\ \boldsymbol{\sigma} = \int_0^t \dot{\boldsymbol{\sigma}} dt, \quad \frac{d\boldsymbol{\sigma}}{dt} - \mathbf{W} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{W} = \lambda I_1(D) \mathbf{g} + 2\mu(D), \\ D = \frac{1}{2} (\hat{\nabla} \mathbf{v} + \hat{\nabla} \mathbf{v}^T), \quad \mathbf{W} = \frac{1}{2} (\hat{\nabla} \mathbf{v}^T - \hat{\nabla} \mathbf{v}), \quad \mathbf{v} = \frac{d\mathbf{u}}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь ρ – плотность, \mathbf{u} – вектор перемещений, \mathbf{f} – вектор ускорения массовых сил, действующих на тело (в том числе сил инерции), $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений Коши, \mathbf{W} – тензор вихря, D – тензор скорости деформаций, $I_1(D)$ – первый инвариант тензора скорости деформаций, $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$, $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – упругие константы Ляме (задаются в соответствии со значениями модуля упругости и коэффициента Пуассона для рассматриваемого материала), \mathbf{v} – вектор скорости.

Для решения сопряженной задачи используется технология FSI (Fluid-Structure Interaction), реализованная в рамках программного продукта ANSYS. Такая связь может быть применена в стационарных и нестационарных задачах с учетом деформации элементов конструкции или движения ее отдельных частей. Суть алгоритма состоит в итеративном расчете твердотельной и газодинамической составляющих задачи на каждом шаге по времени с последующим обменом информацией о распределении давления и перемещений на поверхности исследуемой конструкции [5].

Численная реализация предложенного подхода. В работе предлагается выполнить расчет связанной задачи аэроупругости, причем предлагается сравнить два подхода: с двунаправленной связью и однонаправленной. Отличие двунаправленной от однонаправленной состоит в том, что в первом случае считается, что при обдувании конструкции на ее поверхность действует давление, в результате чего она деформируется и поворачивается, при деформации площадь сопротивления уменьшается, что приводит к необходимости выполнять расчет газодинамики снова и выполнять пересчет давления. При этом следует далее повторять процедуру снова. Общая схема проекта в программе ANSYS WorkBench приводится на рис. 2.

При однонаправленной связи фактически выполняется только одна итерация, а именно определяются давления, действующие на рекламный щит от потока, после чего рассчитывается НДС конструкции. Как видно из приведенного выше

рис. 2, заданы следующие граничные условия: на входе в исследуемую область задается скорость потока, равная 20 м/с, а на выходе из области предлагается задавать остаточное давление, равное 0 Па. Общая схема постановки и граничные условия приведены на рис. 3.

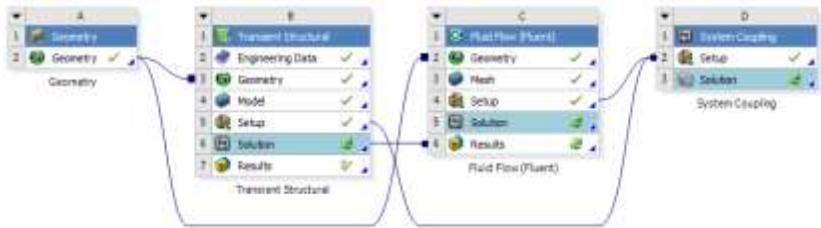
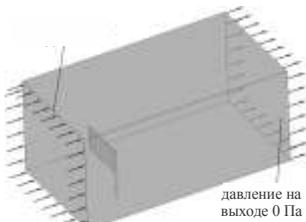


Рисунок 2 – Общая схема проекта для двунаправленной связи



давление на выходе 0 Па

Рисунок 3 – Граничные условия газодинамической задачи



Рисунок 4 – Граничные условия для задачи поиска НДС

Что касается граничных условий для задачи поиска НДС, то они следующие (рис. 4): на все поверхности конструкции, кроме нижней, импортируется давление из задачи газодинамики, а основание зафиксировано.

При выполнении описанных выше задач использовалась КЭ сетка у которой в газодинамической области 330 тыс. элементов, а панель имеет 20 тыс. КЭ (упругая область).

На графике (рис. 5), приведенном ниже, показан итерационный процесс сходимости задачи аэроупругости. В результате решения задачи были получены скорости и давления потока, а также картины НДС от действующих нагрузок для двухсторонней (рис. 6-9) и односторонней (рис. 10-13) связи.

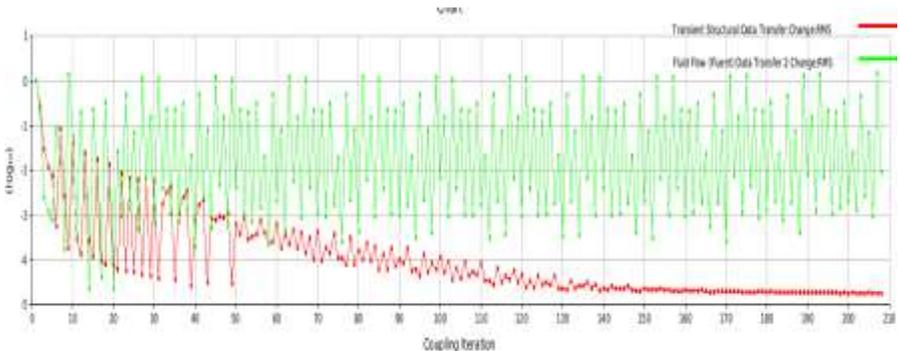


Рисунок 5 – График сходимости связанной задачи

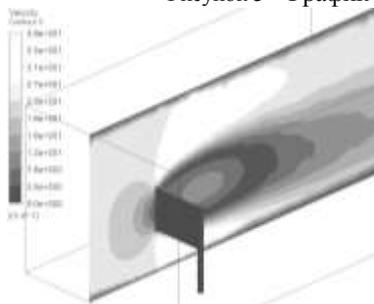


Рисунок 6 – Распределения скоростей

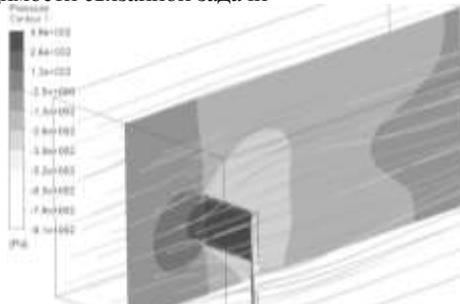


Рисунок 7 – Распределения давлений



Рисунок 8 – Распределения суммарных перемещений



Рисунок 9 – Распределения эквивалентных напряжений

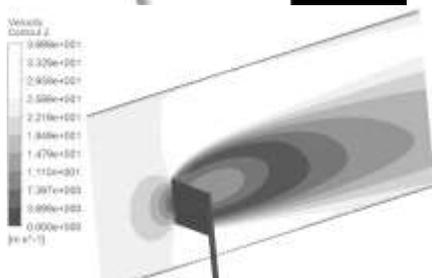


Рисунок 10 – Распределения скоростей

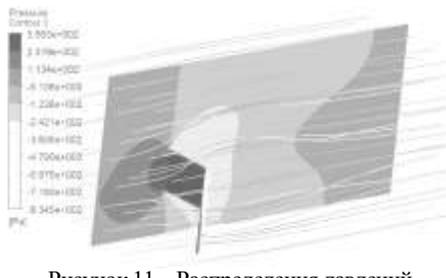


Рисунок 11 – Распределения давлений



Рисунок 12 –
Распределения
суммарных пере-
мещений



Рисунок 13 –
Распределения
эквивалентных
напряжений

Выводы. В статье предложена уточненная методика исследования задачи аэроупругости, в которой было показано, что учет двухсторонней связанности значительно влияет на конечный результат НДС. Приведены расчеты для задачи газодинамики и напряженно-деформированного состояния от действующего давления для тестовой панели.

Список литературы: 1. Журавлев Р.В., Диденко Р.А., Лугинина Н.С., Габов Д.В. Разработка метода прогнозирования уровня вибронпряжений в лопатках ГТД // Труды МАИ, № 65, С. 1-19. 2. Кузьмин И.М., Тонков Л.Е., Котысов С.П. Алгоритмическое программное обеспечение решения задач взаимодействия конструкции с жидкостью/газом на гибридных вычислительных системах // Компьютерные исследования и моделирование. - 2013 Т5 №2 С. 154-164. 3. Васильев А.Ю. Дослідження процесу обтікання корпусу МТ-ЛБ ударною хвилею // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вып.: Машинознавство та САПР – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2009. – № 14. - С.3-10. 4. Бруль С.Т. Моделирование реакции корпуса боевой машины на действие подвижной нагрузки: теория, методы и модели // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вып.: Машинознавство та САПР. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2007. – № 3. - С.24-43. 5. Шлуваев Н.В. Методика численного моделирования аэроупругого взаимодействия компрессорных лопаток газотурбинного двигателя с дозвуковым набегающим потоком воздуха // дис. канд. наук., 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, Пермь, 2014. – 133 с.

Поступила в редколлегию 18.03.2014

УДК 539.3: 623.438

Исследование связанной задачи аэроупругости с применением современных методов расчета / **А.В. Грабовский** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. – X. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 29 (1072). – С. 44-48. – Бібліогр.: 5 назв. ISSN 2079-0075.

Запропоновано новий підхід до розрахунку напружено-деформованого стану елементів з урахуванням взаємодії пружної конструкції з газовим потоком. Він базується на постановці зв'язаної задачі аеропружності. Наведені результати розв'язання тестової задачі.

Ключові слова: зв'язана задача, аеропружність, напружено-деформований стан, швидкість потоку, обтікання

A new approach is proposed to stress-strain state calculation of elements taking into account an interaction of elastic structures with gas flow. It is based on formulation of linked aeroelasticity problem. The results of test problem solving are presented.

Keywords: linked problem, aeroelasticity, stress-strain state, flow velocity, streamlining

УДК621.9.06-52

В.В. ДИОРДИЙЧУК, нач. конструкторского бюро НТК

ЧАО „АзовЕлектроСталь”, Мариуполь;

Н.А. ТКАЧУК, д.т.н., проф., зав. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПІ”;

В.А. ШКОДА, к. т. н., Мариуполь;