

УДК 53.072:519.63

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УПРУГИХ ЛОПАСТЕЙ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВИНТА С ГАЗОВОЙ СРЕДОЙ

© 2012 В.Л. Леонтьев, И.В. Ефременков

Ульяновский государственный университет

Поступила в редакцию 10.10.2012

В статье рассматривается математическая модель взаимодействия упругих лопастей вращающегося винта с газовой средой. Модель предназначена для проведения исследований таких процессов и для оптимизации конструкции винта.

Ключевые слова: лопасти винта, упругость, динамика газа, оптимизация

Математическая модель, описывающая взаимодействие упругих лопастей вращающегося винта с окружающим его газом, состоит, во-первых, из системы пяти дифференциальных уравнений в частных производных

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho + \rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial \rho uw}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial(\rho + \rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial \rho vw}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho uw}{\partial x} + \frac{\partial \rho vw}{\partial y} + \frac{\partial(\rho + \rho w^2)}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial(e+p)u}{\partial x} + \frac{\partial(e+p)v}{\partial y} + \frac{\partial(e+p)w}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – массовая плотность газа, p – внутреннее давление в газовой среде, u, v, w – составляющие вектора скорости V частиц газа, e – полная энергия единицы объема газа

$$e = \rho \varepsilon + \rho |\overline{V}|^2 / 2,$$

причем зависимость $\varepsilon = \varepsilon(p, \rho)$ является известной для исследуемого газа.

Математическая модель состоит также из системы трех дифференциальных уравнений движения лопастей винта

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial z} + F_1 - \rho^* \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial z} + F_2 - \rho^* \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial z} + F_3 - \rho^* \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

шести соотношений закона Гука, связывающих компоненты σ_{ij} тензора напряжений и компоненты ε_{ij} тензора деформаций, а также из шести дифференциальных уравнений, связывающих компоненты тензора деформаций и компоненты U, V, W вектора перемещений точек лопастей винта. В системе (2) величины F_i – компоненты вектора массовой силы, действующей на лопасти винта, ρ^* – массовая плотность материала, из которого изготовлены лопасти. Математическая модель, состоящая из восьми уравнений (1), (2), а также из двенадцати названных уравнений, дополняется условиями сопряжения газа и материала лопастей, которые ставятся на поверхности лопастей, дополняется также краевыми условиями на замкнутой поверхности, ограничивающей цилиндрическую область, занимаемую газом, и начальными условиями, определяющими исходное состояние газа и лопастей винта.

Винт – устройство, совершающее вращательное движение с закреплёнными перпендикулярно оси вращения лопастями, предназначенное для преобразования движения вращения винта в поступательное движение, связанное с перемещением газа вдоль оси вращения. Лопасти винта, вращаясь, вызывают движение газа вдоль оси вращения и, как следствие, движение объекта, на котором установлен двигатель с винтом, в противоположном направлении. Перед винтом со-

Леонтьев Виктор Леонтьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математического моделирования технических систем.

E-mail: LeontievVL@ulsu.ru

Ефременков Иван Валерьевич, студент 6 курса специальности «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах». E-mail: ccd@ulsu.ru

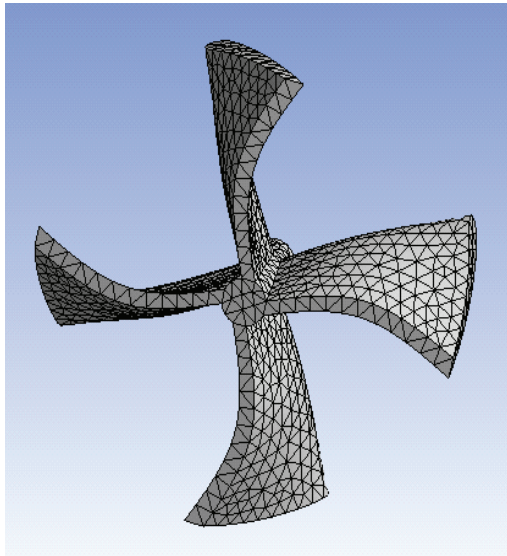


Рис. 1

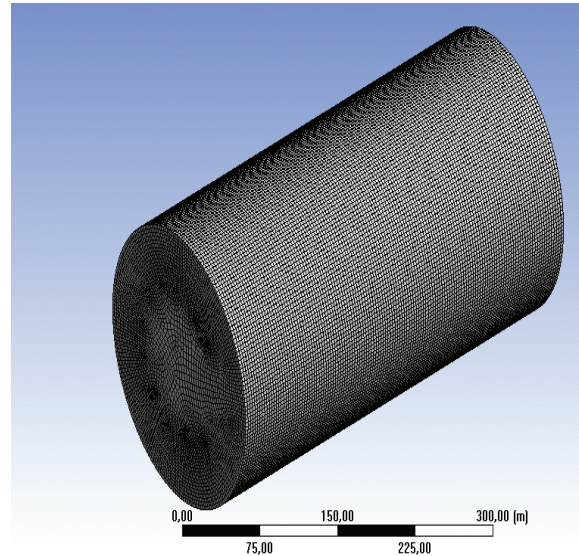


Рис. 2

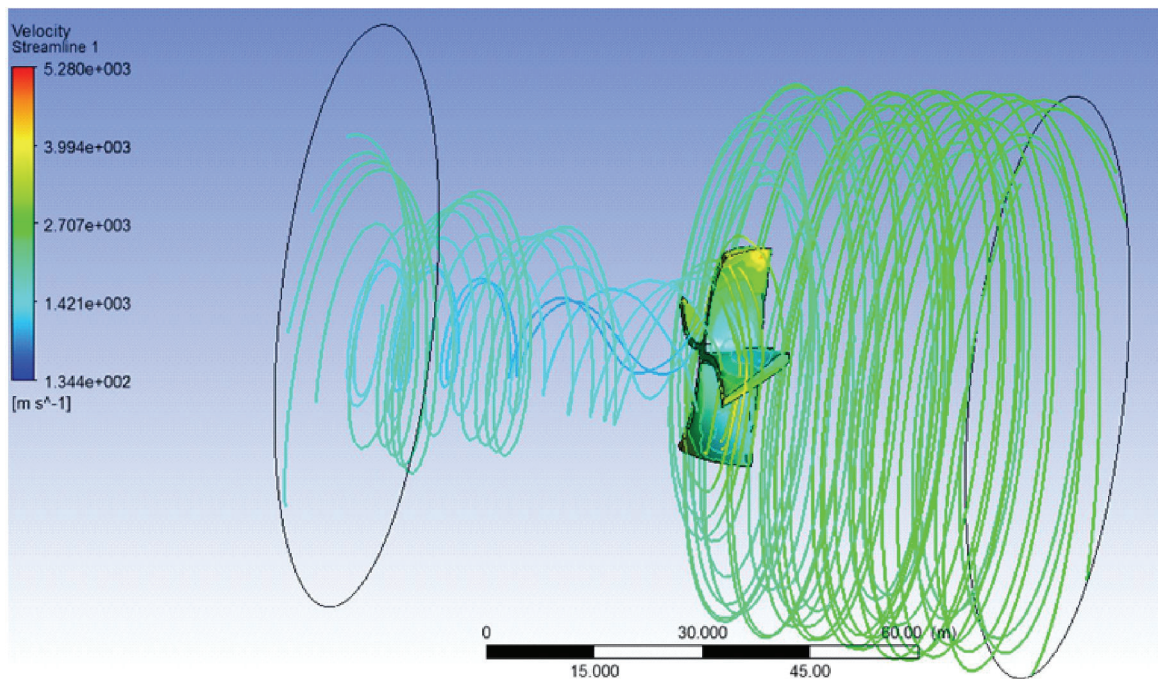


Рис. 3

здаётся область пониженного давления, за винтом – область повышенного давления.

Компьютерное моделирование и исследование проводятся в рамках построенной математической модели с использованием пакета программ ANSYS и направлено на моделирование процессов, проходящих при вращении винта, и на решение основных проблем, связанных с такими процессами. Одной из таких проблем является “эффект запираания”, связанный с отсутствием роста тяги двигателя при увеличении энергии, передаваемой им на винт. Эффект связан с появлением на лопастях винта участков с околосзвуковым и сверхзвуковым течениями газа.

В среде ANSYS создается геометрическая

модель (рис.1) винта с лопастями, помещенного в трехмерную область, имеющую форму цилиндра (рис. 2).

Расчет проводился в ANSYS на основе метода конечных элементов, примененного к деформируемому упругому винту и к газу, который движется в цилиндрической области.

При дискретизации винта и его лопастей создана сетка, состоящая из 4475 конечных элементов (рис.1), материалом винта являлась сталь, скорость вращения винта составляла 1500 оборотов в секунду. Сетка, построенная в цилиндрической области, занимаемой газом, состояла из 358247 конечных элементов (рис. 2). В качестве газа рассматривался воздух. На поверхнос-

ти цилиндрической области задавались значения давления, равные 1 атм.

Полученные результаты расчетов (рис. 3) позволяют проводить анализ процесса взаимодействия упругих лопастей винта с движущимся воздухом и на основе этого анализа оптимизировать конструкцию винта. В результате проведенного расчета по выбранным в пространстве, занимаемом газом, и на самом винте контрольным точкам установлено, каким образом форма лопастей и скорость вращения винта влияют на величину тяги двигателя, каким образом избежать возникновения “эффекта запираания” и как создать

сверхзвуковой воздушный винт без потери тяги и с меньшей шумностью.

Таким образом, создан компьютерный инструмент, использующий приведенную математическую модель и позволяющий проводить оптимизацию конструкций газовых винтов, в частности, воздушных винтов самолетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лурье А.И. Теория упругости. М: Наука, 1970. 940 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Дрофа, 2003. 840 с.

ABOUT INTERACTION OF ELASTIC BLADES OF ROTATING ROTOR AND GAS

© 2012 V.L. Leontev, I.V. Efremenkov

Ulyanovsk State University

The mathematical model of interaction of elastic blades of rotating rotor and gas is considered. The model is intended for investigation such processes and for optimization of construction of rotor.

Keywords: rotor blades, elasticity, dynamics of gas, optimization