

Чемодуров Владимир Трофимович, доктор тех. наук,
профессор кафедры «Механики и сейсмостойкости сооружений»
Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение)
ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского, Россия, г. Симферополь
Кузьменко Ольга Андреевна, ассистент кафедры «Механики и
сейсмостойкости сооружений»

Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение)
ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского, Россия, г. Симферополь

Хитрук Сергей Анатольевич, студент магистратуры
2 курс, группа ТПЗС-м-о-191, «Архитектурно-строительный факультет»
Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение)
ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского, Россия, г. Симферополь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ АЭРОУПРОГОСТИ

Аннотация: Материал, включенный в статью, является обобщением опыта работы авторов в области постановки и проведению модельных испытаний строительных конструкций. Составной частью эксперимента являются теории физического моделирования, которая дает правильный подход к постановке и проведению опытов.

Создание строительных сооружений различного класса и назначения основано на обширных предварительных исследованиях, среди которых, наряду с вычислительной работой, важную роль играет испытания моделей отдельных элементов конструкции. В статье, опираясь на теорию физического моделирования, дается ответ на два вопроса:

- как создать модель, подобрать реальному объекту (висячего мота);
- как пересчитать результаты эксперимента на изучаемый объект.

Ключевые слова: теоретические исследования, механические явления, поток воздуха, постановка задачи, упругие силы, аэродинамические силы.

Annotation: The material included in the article is a generalization of the authors' experience in the field of setting and conducting model tests of building structures. An integral part of the experiment is the theory of physical modeling, which gives the correct approach to the formulation and conduct of experiments.

The creation of construction structures of various classes and purposes is based on extensive preliminary research, among which, along with computational work, an important role is played by testing models of individual structural elements. The article, based on the theory of physical modeling, provides an answer to two questions:

- how to create a model to match a real object (hanging moth);
- how to recalculate the results of the experiment on the object under study.

Keywords: theoretical research, mechanical phenomena, air flow, problem statement, elastic forces, aerodynamic forces.

При чисто теоретических исследованиях механических явлений обычно исследуются различного вида функциональные уравнения – обычно дифференциальные. Эти уравнения служат для установления общих качественных свойств движения и для фактического вычисления искомых функциональных связей с помощью различных математических операций. Однако механическое исследование не всегда возможно осуществить путем математических рассуждений и обсуждений [1]. Очень часто мы не имеем вообще математической постановки задачи, так как исследуемое механическое явление настолько сложно, что для него пока еще нет удовлетворительной схемы и нет еще уравнений движения. С таким положением часто встречаются при решении многих важных задач в области аэромеханики, при изучении прочности и деформации различных конструкций и тому подобное. В этих случаях главную роль играют экспериментальные методы исследования, которые дают возможность установить простейшие опытные факты, на основе которых можно

формировать законы, управляющие исследуемым явлением и записать их в виде некоторых математических соотношений [2].

Рассмотрим колебание плоской пластины в потоке воздуха. В данном случае имеем взаимодействие следующих сил: аэродинамических, упругих и инерционных. Изучение колебательного движения пластины сводится к исследованию задачи о динамической устойчивости конструкции. Потеря динамической устойчивости конструкции происходит по схеме: при некотором случайном отклонении пластины от состояния равновесия появляются колебания, которые поддерживаются энергией потока воздуха, и могут возрасти вплоть до разрушения конструкции [4].

Пусть пластина длиной L_x и поперечным размером L_z имеет жесткое крепление на ее концах. Исследуем ее изгибно-крутильные колебания. При симметрии поперечного размера пластины ось центров масс совпадает с ее осью жесткости, а центр давления потока воздуха располагается примерно на одной четвертой поперечного размера (рис. 1) Введем следующие обозначения физических величин, характеризующих колебательный процесс пластины в потоке воздуха: l – характерный размер; ρ – плотность материала пластины; v – скорость набегающего потока воздуха; m_0 – погонная масса пластины; EI , EI_p – изгибная жесткость и жесткость пластины на кручение; y , Θ – прогиб и угол поворота сечения пластин [3].

Внешняя нагрузка включает в себя:

- подъемная сила на единицу длины пластины

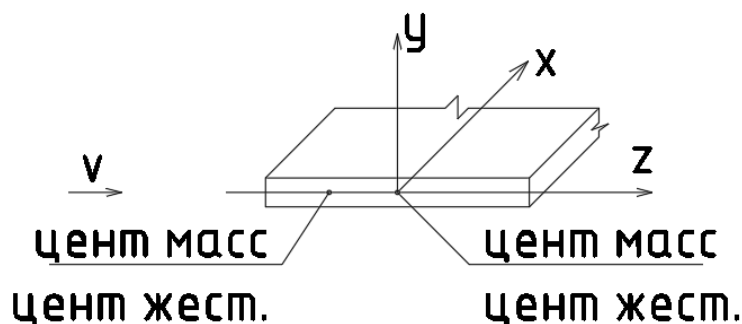


Рис. 1. Схема обтекания пластины потоком воздуха

$$Y = C_y \frac{\rho_0 v^2}{2} L_z; \quad (1)$$

- аэродинамический момент на единицу длины пластины

$$M = C_m \frac{\rho_0 v^2}{2} L_z^2; \quad (2)$$

Здесь ρ_0 – плотность воздуха; C_y , C_m – аэродинамические коэффициенты, которые для плоской пластины имеют теоретические зависимости.

Задача о движении однородной упругой пластины в потоке воздуха сводится к решению уравнений:

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + Y &= 0; \\ GI_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - I_{m_0} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + M &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

с граничными условиями:

при $x=0$ и $x=L_x$:

$$\left. \begin{aligned} y=0; \theta=0. \\ \frac{\partial y}{\partial x}=0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Так как скорость потока воздуха в данном исследовании значительно меньше скорости звука, то его взаимодействие с пластиной ограничим коэффициентом кинематической вязкости - ν , турбулентной составляющей пренебрегаем. Определяемыми физическими величинами являются: y – вертикальное перемещение пластины; σ - напряжение в сечении пластины. Таким образом, можно записать следующие соотношения.

$$\left. \begin{aligned} y &= f_1(l, \nu, \rho, \nu, k, EI, GI_p, m_0, I_m, \lambda, t); \\ \sigma &= f_2(l, \nu, \rho, \nu, k, EI, GI_p, m_0, I_m, \lambda, t). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В круглых скобках дается список определяющих физических величин. (Здесь λ - частота изгибных колебаний пластины). Из них с помощью π -теоремы можно составить восемь безразмерных комбинаций (критериев подобия), приняв l, ν, ρ за физические величины с независимой размерность. Будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{y}{l} &= \psi_1(\text{Re}, k, Ca, GI_p / (EI), m_0 / (l^2 \rho), I_{m_0} / (l^4 \rho), \lambda l / v, St); \\ \frac{\sigma}{v^2 \rho} &= \psi_2(\text{Re}, k, Ca, GI_p / (EI), m_0 / (l^2 \rho), I_{m_0} / (l^4 \rho), \lambda l / v, St) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В формуле (6) входят следующие критерии: $\text{Re} = vl / \nu$ - число Рейнольдса; $Ca = EI / (\rho l^4 v^2)$ - число Коши; $St = vt / l$ - число Струхала [5].

Кроме того, при моделировании необходимо обеспечить подобие внешних форм. Это вытекает из требования подобия условий однозначности.

Рассмотрим возможность выполнения условий (6). Здесь $K_n = K_m$ (n – натура, m – модель). Для этого эксперимент необходимо проводить в воздухе. St указывает на выбор сходственных моментов времени в модели и в натуре. На основании критериев подобия получим масштабы определяющих величин

$$\left. \begin{aligned} m_{EI} = m_{GI_p} = m_\rho m_l^4; m_{I_m} = m_\rho m_l^4 \\ m_{m_0} = m_\rho m_l^2; m_t = m_l / m_v; m_\lambda = m_v / m_l \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Таким образом, при изготовлении модели реальной пластины должно быть обеспечено подобие натуре по распределению жесткости, распределению массы и по внешней форме в воздушном потоке.

Если материал модели совпадает с материалом реальной пластины в этом случае масштаб плотности $m_\rho = 1$ и формулы (7) упрощаются.

Если модель выполнена как копия природы, то может так получиться, что толщина модели окажется очень малой. Для получения приемлемой толщины модели можно использовать материал с более низким модулем упругости [6].

При продувке модели скорость потока воздуха увеличивают постепенно до появления признаков потери упругой деформации. И фиксируют значение критической скорости $v_{крм}$. Далее, для природы получают значения критической скорости потока воздуха:

$$v_{кр.н} = m_v v_{крм} \quad (8)$$

Необходимо отметить, что масштабы физических величин с независимой размерностью (m_l, m_v, m_ρ) выбираются по желанию экспериментатора.

Библиографический список:

1. Батрак А.П. – Планирование и организация эксперимента. Красноярск: ИПЦ СФУ, 2007г. 42 – 45с.
2. Бояршинова А.К., Фишер А.С. – Теория инженерного эксперимента. Челябинск, изд-во ЮУрГУ, 2006г. 23 – 28 с.
3. Чемодуров В.Т., Литвинова Э.В., Сеитжелилов М.С. 2017. Численные методы: монография. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 88 – 98с.
4. Чемодуров В.Т., Жигна В.В. 2012. Методы теории планирования эксперимента в решении технических задач: монография. – Симферополь, 98 – 100с.
5. Погорелов В.И. 2007. Строительная механика тонкостенных конструкций: Уч. пособие для студентов высших учебных заведений. – СПб.: БХВ-Петербург,– 528с.
6. Дмитриев Ю.В., Дороган А.С. 2008 Аналитические методы расчета висячих и вантовых мостов // Уч. пособие// Хабаровск «ДВГУПС».124–131 с.