

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЯХ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА

Постановка проблемы, анализ предшествующих исследований. Исследование взаимодействия деформируемой конструкции и набегающего потока газа или жидкости является актуальной проблемой в таких областях как авиастроение, строительная механика и акустика. Интерес представляют аэроупругие резонансные явления при обтекании крыльев самолетов [1, 2, 3], пролетов мостов [4], участков нефтепроводов, высотных труб и башен [4, 5], колебания стержневых конструкций, якорных систем удержания плавающих объектов [4, 5], снижение шума, вызванного аэроупругими колебаниями [5], деформация тел при погружении в жидкость [5] и т.д. Обычно, для решения задач аэроупругости [4, 5, 6] задаются эмпирическими формулами для аэродинамической нагрузки и решают задачу динамики [4], полагая, что аэродинамическая сила не зависит от динамических характеристик конструкции. Однако такой подход не позволяет учитывать взаимно нелинейные связи между динамикой деформаций и аэродинамическими силами [1, 2]. Особенно сильно нелинейное взаимное влияние проявляется в резонансных явлениях.

Одной из актуальных задач аэроупругости является взаимодействие колеблющегося кругового цилиндра с набегающим потоком. Эта задача является модельной для целого ряда важных прикладных задач, таких как расчет деформаций от ветровой нагрузки высотных труб и башен, участков нефте- и газопроводов над поверхностью рек. При обтекании кругового цилиндра за ним образуется цепочка последовательно сходящихся с боковых поверхностей вихрей – дорожка Кармана. Сход вихрей приводит к периодическому изменению распределения давления и результирующей аэродинамической силы.

Целью настоящей работы является создание методов, для численного решения задач аэроупругости.

Основная часть. Рассмотрена задача о колебаниях жесткого кругового цилиндра, закрепленного пружинами в вертикальном и горизонтальном направлении. Для набегающего потока используются уравнения Навье-Стокса несжимаемой жидкости, записанные в виде законов сохранения в связанной с цилиндром подвижной системе координат.

$$\oint_S (\mathbf{V} \mathbf{n} \rho) dS = 0, \quad (1)$$

$$\iiint_W \frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} dW + \oint_S \left[\mathbf{V} \mathbf{n} (\rho \mathbf{V}) - \mu \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial n} \right) \right] dS = - \iiint_W \nabla p dW + \iiint_W \mathbf{G} dW, \quad (2)$$

где W – контрольный объем, S – поверхность W , $\mathbf{n}$ – внешняя нормаль к S , $\mathbf{V}$ – вектор скорости, ρ – плотность, p – давление, μ – коэффициент вязкости, $\mathbf{G} = -\rho \mathbf{h}''$ – вектор массовых сил инерции в подвижной системе координат, $\mathbf{h}$ – вектор перемещения цилиндра. Система (1)-(2) решается численно с помощью алгоритма типа SIMPLER [7].

Уравнение нестационарного движения цилиндра имеет вид

$$m \mathbf{h}'' + \mathbf{K} \cdot \mathbf{h} = \mathbf{Q}, \quad (3)$$

где m – масса цилиндра, $\mathbf{K}$ – жесткость пружин, аэродинамическая сила, действующая на цилиндр, включает сумму сил давления и трения на поверхности τ_w

$$\mathbf{Q}(t) = \oint_S (-p \cdot \mathbf{n} + \tau_w \mathbf{t}) dS, \quad (4)$$

где $\mathbf{n}, \mathbf{t}$ – нормаль и касательная к поверхности цилиндра S .

В начальный момент времени $\mathbf{h} = 0$, $\mathbf{h}' = 0$. Уравнение динамики (3) имеет аналитическое решение, полученное в предположении о линейном изменении силы $\mathbf{Q}(t)$ на каждом шаге по времени.

На рис.1–4 показаны результаты расчета задачи обтекания цилиндра равномерно ускоряющимся потоком. В расчетах использовалась сетка 60×120 а также схема TVD 3-го порядка точности ISNAS. В начальный момент времени на цилиндр набегает поток с числом $Re=50$. Затем скорость потока увеличивается по закону $V(t)=1+t/200$. На рис.2 показана линейная зависимость амплитуды подъемной аэродинамической силы Q_y от скорости набегающего потока для неподвижного цилиндра.

На рис.3–4 показаны результаты расчетов для колеблющегося цилиндра при $m=100$, $K_x=K_y=200$. На рис.3 отчетливо видно проявление взаимного влияния динамики и аэродинамики. При приближении частоты срыва вихрей к собственной частоте колебаний цилиндра происходит сначала рост амплитуды подъемной силы $Q_y(t)$ (при $t=330-350$), а затем ее затухание (при $t=350-700$) (рис.3 а), при этом частоты колебаний Q_y и h_y синхронизируются. Минимуму амплитуды Q_y соответствует максимум амплитуды перемещения h_y (рис.3). Причина такого подавления подъемной силы заключается в структуре течения за цилиндром (рис.1). В промежутке t от 350 до 700 вихри образуются на расстоянии порядка одного диаметра за цилиндром (рис.1 б) и слабо влияют на распределение давления в кормовой части в отличие от случая неподвижного цилиндра (рис.1 а), когда вихри образуются в непосредственной близости от кормы цилиндра. При $t > 750$ период Q_y резко меняется и становится почти в два раза меньше периода колебаний h_y .

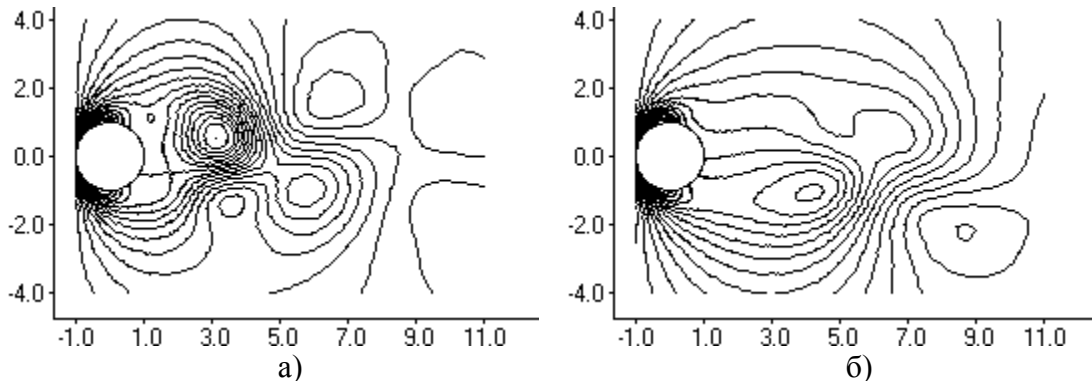


Рис.1. Мгновенное распределение изобар в следе за цилиндром а) – неподвижный цилиндр, б) – колеблющийся цилиндр

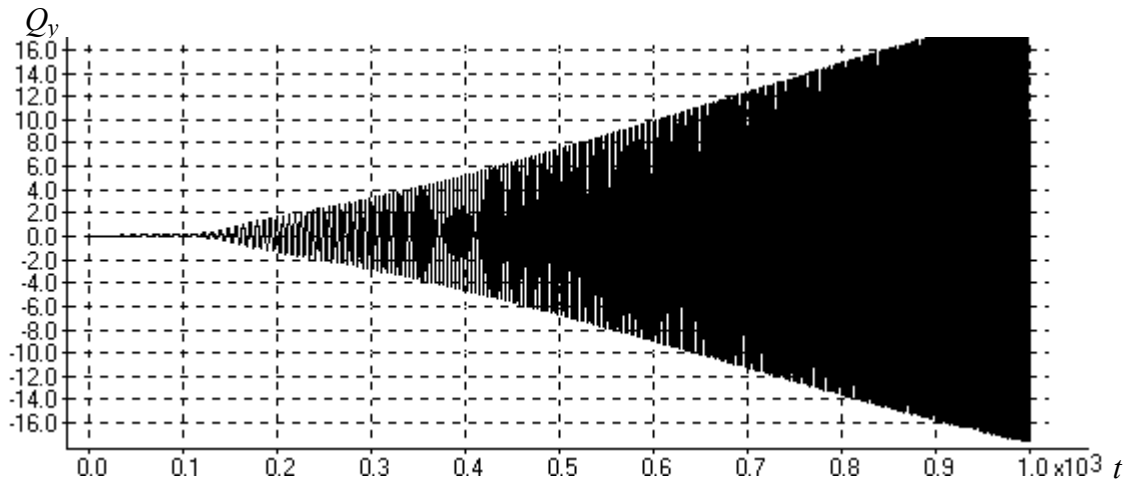
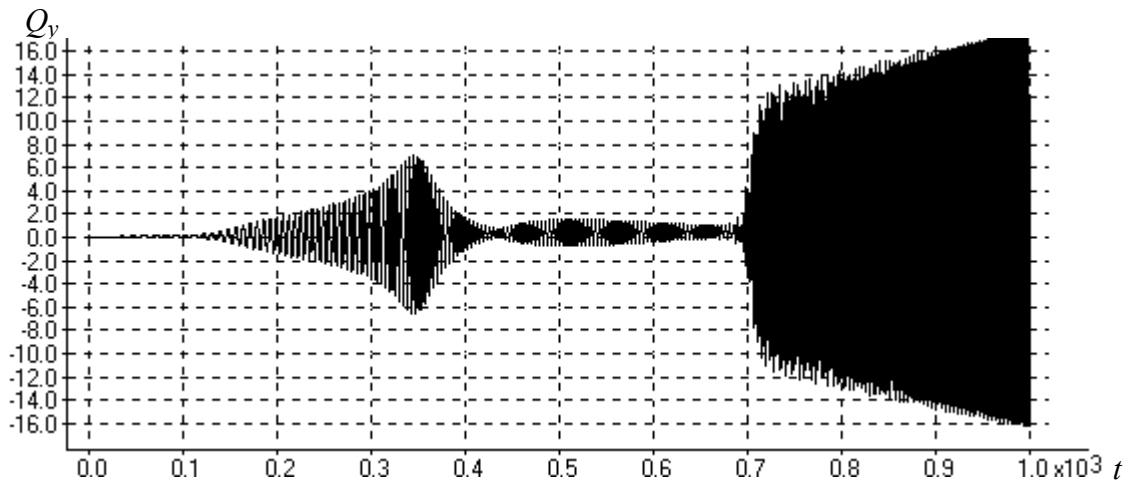
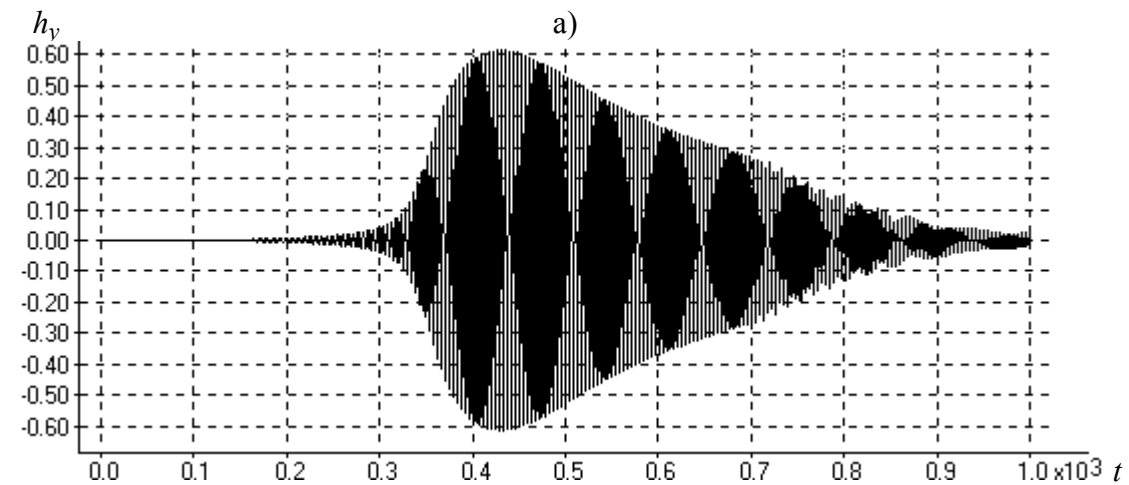


Рис.2. Изменение по времени подъемной силы Q_y (без колебаний цилиндра)



а)



б)

Рис.3. Изменение по времени: а) – подъемной силы Q_y , б) – перемещения h_y

На рис.4, где показана траектория цилиндра, видно, что изменение в структуре течения при $t > 750$ приводит к изменениям характера колебаний.

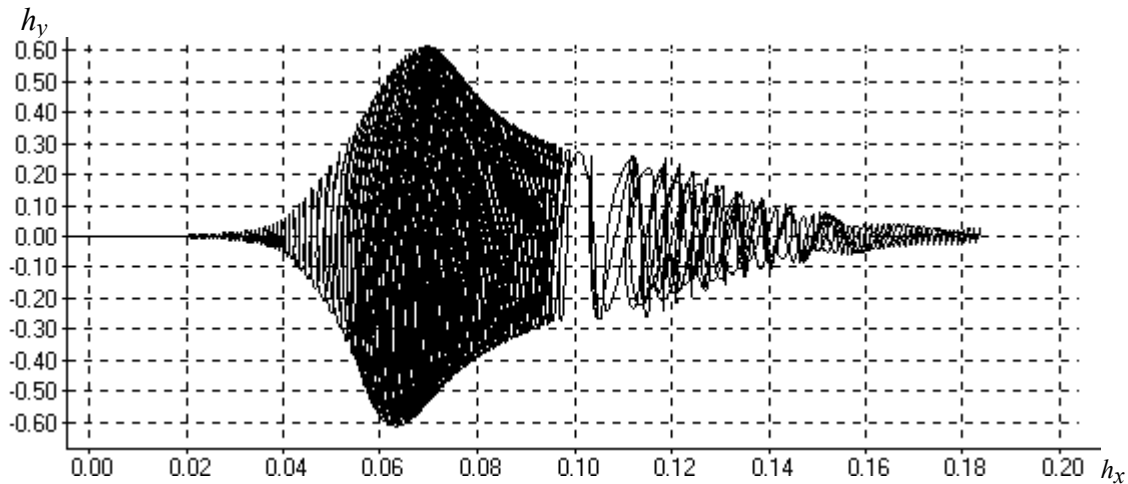


Рис.4. Траектория перемещения цилиндра

Выводы. Рассмотрен численно-аналитический метод решения связанной задачи аэроупругости. На примере задачи об аэроупругих колебаниях кругового цилиндра рассмотрено явление аэродинамического резонанса. Показано сильное взаимное влияние динамических и аэродинамических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Хрущ В.К. Возбуждение колебаний консоли крыла при переходе через скорость звука. // Вісник Дніпр-го ун-ту. Механіка. –2001. Вип. 4. –Т.1. –С.201–207.
2. Cho J., Chang Y. Supersonic flutter analysis of wings using an unsteady 3D panel method // Computer and Fluids. – 2001. – V. 30. –P.237–256.
3. Берковский Б.С. Статическая аэрогидроупругость несущих элементов и их систем, работающих вблизи границ. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 1983. – 122с.
4. Светлицкий В.А. Механика стержней. – М.: Высшая школа, 1987. –304с.
5. Горшков А.Г., Тарлаковский Д.В. Нестационарная аэрогидроупругость тел сферической формы. – М.: Наука, 1990. –264с.
6. Фершинг Г. Основы аэроупругости. –М.: Машиностроение, 1984. –600с.
7. Кудинов П. И. Метод расчета процессов гидродинамики и теплообмена в неортогональных криволинейных координатах // Вісник Дніпр-го ун-ту. Механіка, – 1998. –Вип.1. Т.1. –С. 117–125.

КУДИНОВ Павел Иванович – к.ф.-м.н., доцент кафедры технической механики Днепропетровского национального университета.
Научные интересы: численные методы аэрогидродинамики и тепломассообмена.

ЕРИЧЕВА Валентина Анатольевна – ассистент кафедры технической механики Днепропетровского национального университета.
Научные интересы: численные методы аэрогидродинамики и тепломассообмена, задачи упругости тонкостенных конструкций.

Математическое моделирование резонансных явлений при аэроупругих колебаниях кругового цилиндра / П.И. Кудинов, В.А. Еричева //

Рассмотрен численно-аналитический метод решения задачи об аэроупругих колебаниях кругового цилиндра. Численно исследовано явление аэродинамического резонанса при равноускоренном движении колеблющегося цилиндра в потоке вязкой несжимаемой жидкости. Показано сильное взаимное влияние динамики и аэродинамики.

Математичне моделювання резонансних явищ при аеропружних коливаннях кругового циліндра / П.І. Кудінов, В.А. Єрічева //

Розглянуто чисельно-аналітичний метод розв'язку задачі про аеропружні коливання кругового циліндра. Чисельно досліджено явище аеродинамічного резонансу при рівноприскореному русі циліндра, що коливається в потоці в'язкої нестисливої рідини. Показано сильний взаємний вплив динаміки та аеродинаміки.

Mathematical simulation of resonant in aeroelastic oscillations of circular cylinder / P.I.Kudinov, V.A.Ericheva //

Numerical-analytical method for solving aeroelastic oscillations of circular cylinder was considered. A phenomenon of aeroelastic resonant for linearly accelerated motion of oscillating circular cylinder in viscid incompressible fluid flow was numerically analyzed. Strong interaction of elastic deformation and aerodynamic loads was showed.