



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

№4, ТОМ 14 (2008) 217-225

УДК 624.042

(08)-0167-1

ХАОС В АЕРОПРУЖНИХ СИСТЕМАХ

М.І. Казакевич

*Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
вул. Ак. Лазаряна, 2, 49010, м. Дніпропетровськ, Україна.*

E-mail: mkazak@rambler.ru

Отримана 20 жовтня 2008; прийнята 27 жовтня 2008

Анотація. У статті наведені переконливі докази існування в нелінійних детермінованих елементах будь-якої природи хаотичних коливань як непередбачуваного режиму їх динамічної поведінки. Причому непередбачуваність як ознака хаосу зумовлена, в першу чергу, вихідними умовами. На прикладі взаємодії вітрового потоку з тандемом кругових циліндрів досліджено характер обтікання, механізм виникнення і можливі режими аеропружних коливань залежно від таких вихідних умов, як швидкість потоку, скіс потоку (взаєморозтискування обох циліндрів відносно напрямку потоку), власна частота коливань циліндрів. Показана хаотична природа цілого ряду явищ аеропружної нестійкості на прикладі галоупування.

Ключові слова: онелінійна детермінована система, тандеми циліндрів, аеропружні явища, хаотичні коливання.

ХАОС В АЭРОУПРУГИХ СИСТЕМАХ

М.И. Казакевич

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна*

ул. Ак. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина.

E-mail: mkazak@rambler.ru

Получена 20 октября 2008; принята 27 октября 2008

Аннотация. В статье приведены убедительные аргументы существования в нелинейных детерминированных системах любой природы хаотических колебаний как непредсказуемого режима их динамического поведения. Причем непредсказуемость как признак хаоса обусловлен, в первую очередь, начальными условиями. На примере взаимодействия ветрового потока с тандемом круговых цилиндров исследованы характер обтекания, механизм возникновения и возможные режимы аэроупругих колебаний в зависимости от таких начальных условий, как скорость потока, скос потока (взаимное расположение обоих цилиндров относительно направления потока), собственная частота колебаний цилиндров. Показана хаотическая природа целого ряда явлений аэроупругой неустойчивости на примере галоупирования.

Ключевые слова: нелинейная детерминированная система, тандем цилиндров, аэроупругие явления, хаотические колебания.

CHAOS IN AEROELASTIC SYSTEMS

M.I. Kazakevitch

*Dnepropetrovsk National V.Lazaryan University of Railway Transport, 2, Acad. V.Lazaryan Str.,
Dnepropetrovsk 49010, Ukraine.
E-mail: mkazak@rambler.ru*

Received 20 October 2008; accepted 27 October 2008

Abstract. It's well-reasoned that chaotic oscillations exist in non-linear determined systems of any origin as an unpredictable regime of their dynamic behaviour. This unpredictability as the chaos feature is first of all conditioned by the initial conditions. By the example of the interaction between a wind flow and a tandem of cylinders there was investigated a character of streamline, a mechanism of the onset and possible regimes of aero-elastic oscillations depending on such initial conditions as a flow velocity, a flow slant (a relative arrangement of both cylinders as to the flow direction), a proper frequency of the cylinders oscillations. There is shown a chaotic nature of a number of the aero-elastic instability phenomena by the example of galloping.

Keywords: non-linear determined system, cylinder tandem, aero-elastic phenomena, chaotic oscillations.

В нелинейных системах различной природы независимо от того, являются ли они моделями аэроупругих колебаний механических систем или других физических объектов, химических процессов, биологического поведения живых структур, экономических или социально-политических явлений, энергетический обмен носит неадекватный характер. Бульшие затраты начальной энергии не гарантируют экстремальных состояний. И, наоборот, при определенных условиях незначительные порции энергии способны вывести систему на резонансные траектории [1]. При этом бесспорным фактом является доминирующая роль начальных условий в проблеме обусловленности существования устойчивых решений в частотной области многозначности амплитуд как признака предсказуемости [1]. Введение понятия «области притяжения начальных условий» позволило предсказывать существование устойчивых решений нелинейного осциллятора в частотной области с тремя и более устойчивыми предельными циклами Пуанкаре [2]. Непредсказуемость как признак хаоса в нелинейных детерминированных системах обуславливается именно фундаментальной ролью начальных условий в определенных областях существования [3].

В аэроупругих системах примером хаотических процессов можно считать турбулентность, срывы вихрей Кармана, кризис обтекания кругового и близких к нему тел, панельный флат-

тер, бафтинг как интерференцию первичного и вторичного отрывов за упругим телом в следе, а также колебания на границе области галопирования в спутной струе при обтекании тандема упругих элементов в скошенном потоке или на границе области синхронизации автоколебаний вихревого возбуждения упругого элемента.

Примеры хаотических колебаний в различных аэроупругих системах, таких как парогенераторы АЭС, пластина при одностороннем обтекании сверхзвуковым потоком, обшивка ракетносителя «Сатурн» описаны в работах [4-6].

Основной физической моделью для исследования явлений аэроупругой неустойчивости гибких элементов конструкций является упругая одномассовая система, причем, для вихревого возбуждения галопирования и срывного флаттера можно ограничиться одной степенью свободы, а для дивергенции, изгибно-крутильного флаттера и параметрических колебаний – двумя степенями свободы.

В качестве математических моделей явлений аэроупругой неустойчивости принято нелинейное дифференциальное уравнение Дуффинга второго порядка, отражающее геометрическую нелинейность аэроупругих систем повышенной гибкости и диссипативную нелинейность при учете нестационарных аэродинамических сил.

Особенностью колебательных режимов упругих конструкций в ветровом потоке является

их несимметричность. Действительно, вертикально ориентированные конструкции под действием скоростного напора ветра имеют криволинейную форму упругого равновесия, относительно которого происходят колебания. Горизонтально ориентированные конструкции также имеют криволинейную форму упругого равновесия под действием вертикальных постоянных нагрузок, т.е. собственного веса, веса оборудования. В правой части нелинейного дифференциального уравнения Дуффинга – гармоническая возмущающая сила постоянная составляющая. Принцип суперпозиции неприменим. Как показывают многочисленные исследования, например, [6,7] взаимодействие гибких сооружений с ветровым потоком в приземном слое атмосферы сопровождается большим разнообразием аэроупругих явлений. В самой фрагментарной форме эти явления классифицированы и представлены в работах [6,7]. Эта классификация охватывает практически все известные к настоящему времени реакции упругих тел в ветровом потоке, кроме весьма специфических «дождевых» колебаний и реакций на одиночный порыв ветра.

Общую физическую картину возникновения аэроупругих реакций при взаимодействии инерционных, упругих и диссипативных сил упругой системы с аэродинамическими силами можно символически представить в виде обобщенной системы Коллара [6,7].

Параметры аэроупругих явлений обусловлены формой поперечного сечения элементов конструкций, их конфигурацией и ориентацией относительно направления ветрового потока, с одной стороны, и перечисленными свойствами упругой системы, с другой стороны. Кроме того, существенную роль играют механическая структура ветра, т.е. скорость, направление и продольно-поперечные пульсации ветра, а также влияние снеговых и гололедо-изморозевых отложений.

Таким образом, данная проблема оказывается в сфере взаимодействия таких наук, как аэрогидромеханика, гидрометеорология, теория сооружений и нелинейная механика.

К основным причинам аэроупругих явлений можно отнести:

- порывы ветра;
- периодические аэродинамические силы, связанные со срывом вихрей Кармана;

- отрицательное аэродинамическое демпфирование;
- нестационарные и квазистационарные аэродинамические силы;
- периодические изменения параметров упругих элементов конструкций;
- аэродинамическая связь между изгибной и крутильной формами перемещений.

Следует обратить внимание на связь между возможными режимами отрыва потока и соотношениями размеров поперечного сечения упругих тел при различных типах аэроупругой неустойчивости.

Перейдем к анализу нелинейных диссипативных систем на основе дифференциальных уравнений Дуффинга, которые являются вполне достаточными и приемлемыми для исследования критериев возникновения и условий существования аэроупругих автоколебаний. На смену традиционным представлениям о детерминированных и случайных колебаниях в нелинейных системах приходит понимание существования также хаотических колебаний. При этом необходимо различать случайные и хаотические движения.

Открытие нового явления в нелинейной динамике – хаотических колебаний коснулось даже простейших с точки зрения математического описания нелинейных детерминированных систем с одной степенью свободы, таких как система Дуффинга.

В 60-х годах нами при исследовании нелинейного осциллятора Дуффинга была убедительно доказана доминирующая роль начальных условий в проблеме обусловленности существования устойчивых решений в частотной области многозначности амплитуд [1]. Было введено понятие «области притяжения начальных условий», которое впоследствии стало широко известно под названием «аттрактора». Теперь уже можно было предсказывать существование устойчивых решений осциллятора Дуффинга в частотной области с тремя и более устойчивыми предельными циклами Пуанкаре. В настоящее время является неоспоримой роль начальных условий в возникновении странных аттракторов в нелинейных детерминированных системах как признака непредсказуемости – хаоса. Здесь уместно для убедительности привести слова Ильи Пригожина в работе [8]:

«начальные условия и динамика перестают быть независимыми».

Для простейшей динамической системы Дуффинга не всегда возможно предсказать движение на заданном интервале времени при определенных начальных условиях [2,3]. В хаотических колебаниях, в отличие от случайных, обнаруживается внутренний порядок, который обуславливает возможность предсказания определенных свойств динамических детерминированных систем. Как отмечалось выше, примером хаотических явлений можно считать турбулентность, срывы вихрей Кармана, кризис обтекания круглоцилиндрических и близких к ним тел в гидроаэромеханике. Причем, эти явления не случайны, часто носят вполне регулярный характер и предсказуемы на основе современных теорий.

Сближение устоявшихся понятий и новых, связанных с хаотическими колебаниями, наблюдается при рассмотрении нестационарных движений, когда четко разграничить переходный хаос и переходные процессы, проследить

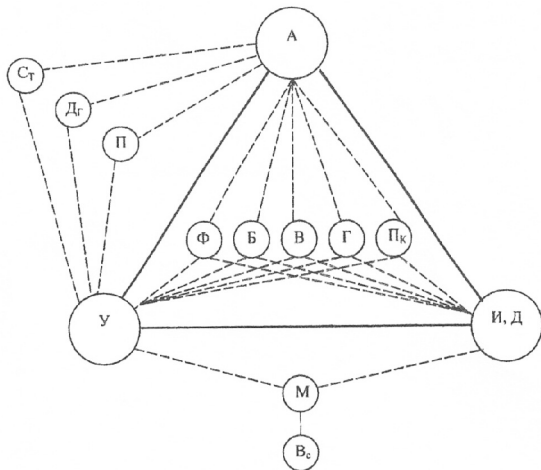


Рис. 1. Обобщенная схема Коллара:

А – аэродинамические силы; У – упругие силы; И – инерционные силы; Д – диссипативные силы; V_c – внешние силы, не связанные с ветровыми воздействиями; C_t – статические деформации; П – потеря устойчивости плоской формы изгиба; D_r – дивергенция; Ф – классический или срывной флаттер; Б – бафтинг; В – вихревое возбуждение; Г – галоширование; P_k – параметрические колебания; М – механические колебания.

переход от странных аттракторов к предсказуемым аттракторам (периодическим или квазипериодическим движениям) или наоборот, весьма затруднительно.

Аттрактором называют множество точек или подпространство в фазовом пространстве, к которому приближается траектория после затухания переходных процессов. Классические примеры аттракторов – точки равновесия, неподвижные точки отображений, предельные циклы или поверхности торов для квазипериодических движений.

В отличие от классических задач, где граница области притяжения начальных условий (или других параметров системы) представляет собой гладкую непрерывную линию (или поверхность), в нелинейных системах обнаружены негладкие границы. Одной из основных особенностей хаотических колебаний и является

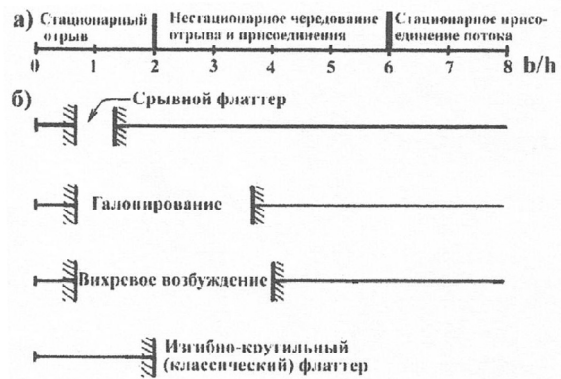


Рис. 2. Режимы отрыва потока (а) и возможные типы аэроупругой неустойчивости (б).

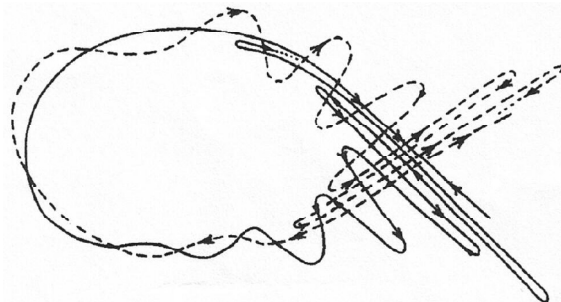


Рис. 3. Асимптотические траектории «множества Мельникова» и образуемые ими каналы.

трансформация гладкой границы области притяжения. Гладкая граница распадается (расслаивается) на бесконечное множества складок, образующих фрактальную структуру.

Впервые численный эксперимент, обнаруживающий странные аттракторы в нелинейных детерминированных колебательных системах, был выполнен в работе E.N.Lorenz [9] при изучении вынужденного вязкого гидродинамического течения для возможностей прогноза погоды. Однако хаотические колебания, математическим образом которых являются странные аттракторы, были годом ранее обнаружены S. Kobayashi [10] при исследовании с помощью аналитических методов и аналогового моделирования колебаний изогнутой пластины при одностороннем обтекании сверхзвуковым потоком – панельного флаттера. Известны и более ранние упоминания, например, I. Marsden, о нерегулярных колебаниях в экспериментах НАСА (США) в доспутниковую эпоху, но в то время для их осмысления и анализа не было подходящих физических и математических моделей. Позднее хаос в аэроупругой системе при панельном флаттере наблю-

дался на поверхности внешних оболочек во время первых полетов ракетносителей «Сатурн».

В работе Марсдена [11] делается предположение о взаимосвязи между отрывным обтеканием круговых цилиндров и возможностью возникновения странных аттракторов.

В этой связи особое внимание следует обратить на ранние работы В.К. Мельникова [12,13], который предложил метод получения границ параметров динамических систем с несколькими несмежными положениями равновесия, в которых возможны хаотические явления. Этот метод был в 60-е годы основным математическим аппаратом исследования в Объединенном Институте Ядерных Исследований в Дубне нестационарных процессов при изучении термоядерных реакций.

Принципиальными предпосылками применимости метода Мельникова являются однородность и непрерывность границ фазовых пространств. Следствие этого допущения – возможность одновременного существования как стохастических (случайных), так и хаотических, чувствительных к начальным условиям,

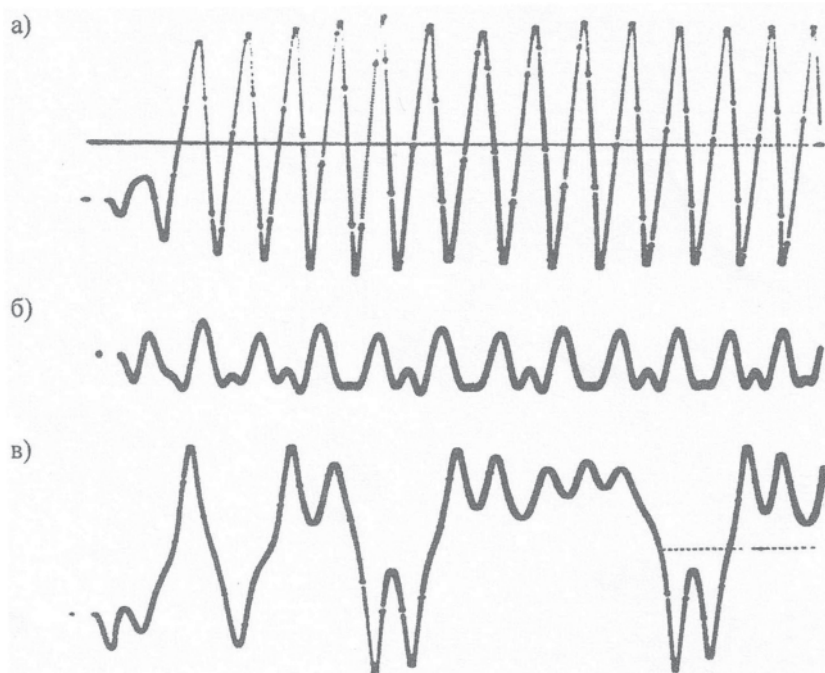


Рис. 4. Временные процессы нелинейных систем с двумя потенциальными ямами: а) «большие» колебания; б) «малые» колебания; в) хаотические колебания.

исследованию хаотических колебаний в детерминированных системах при квазипериодическом возмущении получил название «детерминированного метода Мельникова». Дальнейшее развитие «метод Мельникова» получил за последние 20 лет, в основном, за рубежом, в многочисленных исследованиях динамических систем различной природы, например, медленно меняющихся систем [14], систем с дихотомными и мультипликативными шумами [15]. К одной из самых ранних работ, в которых были обнаружены хаотические колебания, относится кандидатская диссертация автора (1967г.), фрагменты из которой (см. рис. 4) приведены в работе [16], стр. 146-147.

Обращаясь к более поздним исследованиям, отметим, что переход от строго регулярных к хаотическим колебаниями в нелинейных аэроупругих системах описан в ряде работ. Например, такой переход обнаружен при гидроупругом расчете трубок парогенератора АЭС с реакторами, охлаждаемыми водой под давлением (см. [63]). Эволюции предельных циклов отражают переход регулярных колебаний к хаотическим и обратно. Их анализ подвиг нас обратиться к проблеме обтекания не пучка труб, а тандема круговых цилиндров. Этот интерес был связан с очень широким распространением тандема цилиндров в различных классах сооружений и элементов конструкций: несущих канатах; канатных подвесках и оттяжках; надземных трубопроводах – магистральных, внутризаводских; проводниках расщепленных фаз ЛЭП; элементах пространственных мостов и многих других.

Результаты изучения характера обтекания, механизма возникновения и возможных режимов аэроупругих колебаний тандема цилиндров (см. рис. 5) в зависимости от скорости потока, взаимного их расположения и собственной частоты цилиндров подробно изложены в работах [6] (стр. 128-140) и [17].

Аналитическое решение задачи влияния начальных условий в виде начальных взаимных смещений цилиндров пока отсутствует, поэтому предсказуемость возможных периодических режимов колебаний их в потоке может быть осуществлена только экспериментально. Для двух разнесенных, т.е. неспаренных, цилиндров траектории движения их свободных концов

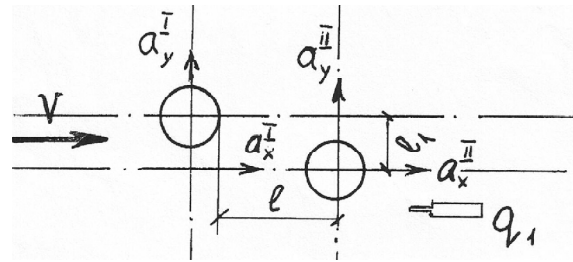


Рис. 5. Схема расположения тандема цилиндров в аэродинамической трубе.

(при консольной схеме закрепления) гораздо более замысловаты и зависят от тех же факторов, что и для спаренных цилиндров, но в значительной степени и от скоса потока, т.е. взаимного их расположения относительно направления потока. В серии проведенных опытов (см. работы [6,17]) зазор между цилиндрами в направлении потока постоянный и равен одному калибру. Оба цилиндра имели одинаковый диаметр и собственную частоту. Изменялся лишь параметр скоса потока

$$\varphi = \arctg l_1/l,$$

$$\bar{l}_1 = l_1/d = 0 \div 1,35.$$

Детальное изучение поведения тандема цилиндров в скошенном потоке обнаруживает некоторые закономерности в возникновении аэроупругой неустойчивости типа галопирования второго по потоку цилиндра в пространстве параметров скоса потока, зазора между цилиндрами и степени турбулентности потока, которые в сущности выступают в качестве начальных условий. При этом, при исследовании аэродинамической интерференции нестационарных аэродинамических сил в процессе обтекания тандема цилиндров были исследованы не только аэродинамические характеристики лобового сопротивления c_x и поперечной силы c_y в зависимости от скоса потока и степени его турбулентности, но и траектории их движения с помощью визуализации течений. Необходимо отметить два важных обстоятельства. Во-первых, физический смысл потока с прикладной точки зрения – это не смещение одного цилиндра относительно другого, а отклонение направления ветрового потока от оси

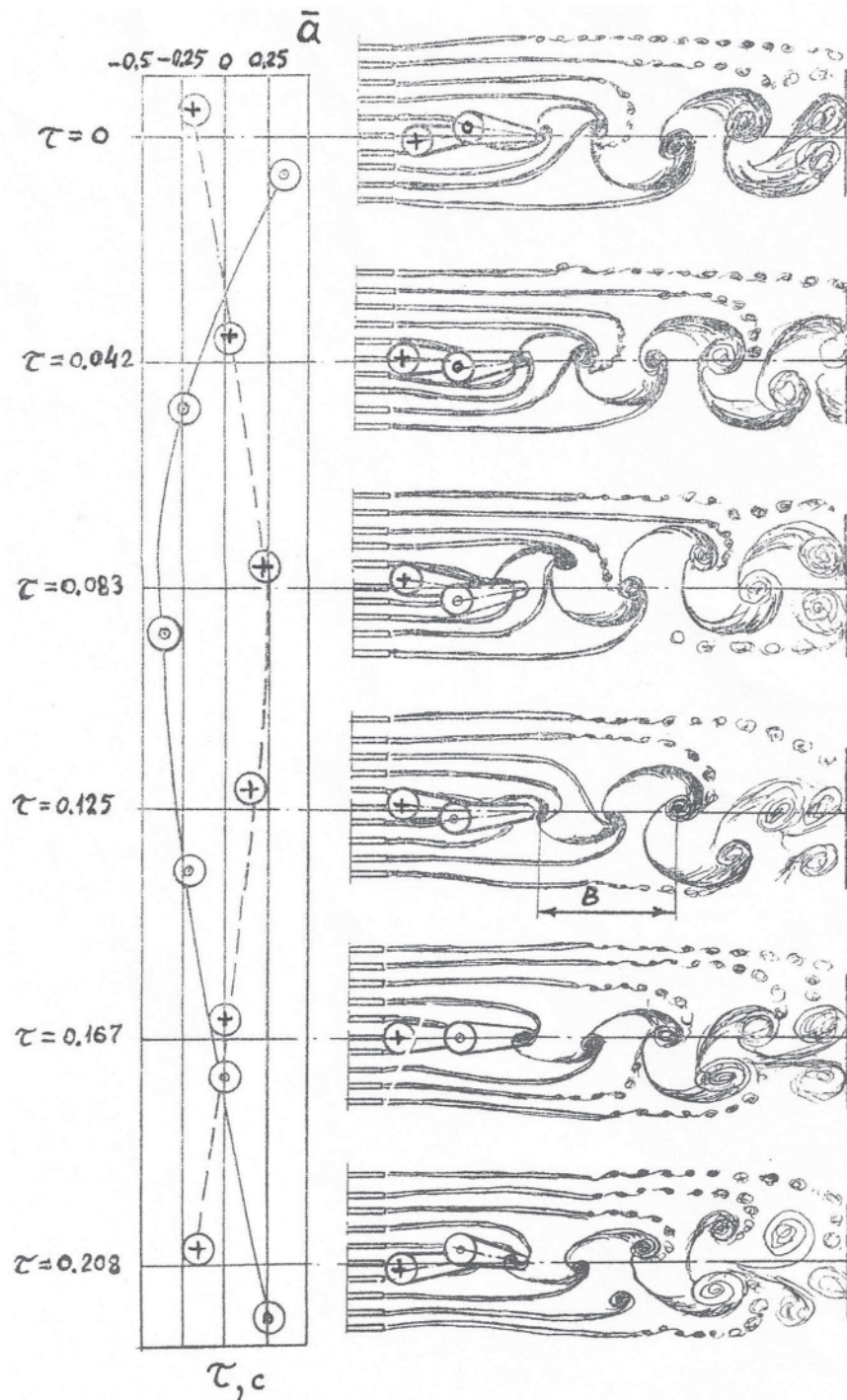


Рис.6. Траектория движения и аэродинамический след при визуализации течения дымом ($V = 1,1$ м/с; $f_0 = f_{01} = 3,6$ Гц; $Sh = Sh_1 = 0,1$; $V_{np} = 10$).

отклонение направления ветрового потока от оси цилиндров. А поскольку направление ветрового потока носит непредсказуемый характер, важно оценить влияние скоса потока на возможность возникновения установившихся автоколебаний

аэроупругой неустойчивости.

Во-вторых, анализ аэродинамических характеристик c_x и c_y обнаруживает в определенном интервале изменений параметра скоса потока отрицательный градиент подъемной силы,

$$c_y^\alpha + c_x < 0$$

свидетельствует о возможности неустойчивости типа галопирования. С возрастанием турбулентности область неустойчивости значительно уменьшается.

Поскольку амплитуды автоколебаний a обратно пропорциональны значению критической скорости $V_{кр}^{zai}$, а критическая скорость, в свою очередь, обратно пропорциональна параметру Ден-Гартога ($c_y^\alpha + c_x$):

$$a = \frac{2V^2}{\omega_0 V_{кр}^{zai}} \sqrt{1 - \frac{V_{кр}^{zai}}{V}};$$

$$V_{кр}^{zai} = \frac{2m\delta\omega_0}{|c_y^\alpha + c_x| \pi \rho d},$$

становится очевидным, что интенсивность автоколебаний напрямую оценивается интенсивностью параметра Ден-Гартога. Наиболее интенсивны автоколебания цилиндра в следе при минимальной турбулентности $\varepsilon = 0,5\%$. Таким образом, наличие зазора между двумя цилиндрами, а также скоса потока значительно усугубляют непредсказуемость периодических режимов колебаний, что несомненно подтверждает хаотическую природу данной аэроупругой системы.

Подробный анализ взаимодействия изолированного цилиндра и тандема цилиндров с ветровым потоком, приведенный выше, убедительно показывает актуальность прогноза возникновения как установившихся аэроупругих колебаний (явлений аэроупругой неустойчивости), так и непредсказуемых (хаотических) режимов колебаний для широкого класса конструкций и инженерных сооружений, упомянутых выше.

Новые знания и подходы к осмыслению и интерпретации наблюдаемых в аэроупругих системах явлений позволят расширить границы хаоса в аэроупругих системах в область других явлений неустойчивости, обусловленных взаимодействием потока с упругими элементами или системами упругих элементов.

Литература

1. Казакевич М.И., Кваша Э.Н., Редько С.Ф. Влияние начальных условий на характер установившихся колебаний систем с нелинейной восста-
2. Казакевич М.И., Редько С.Ф., Кулябко Ю.В. Предсказуемые аттракторы в нелинейных несимметричных системах. Докл. АН УССР. Сер.А., Физ.-мат. и техн. науки, 1990, № 1, с.18-20.
3. Казакевич М.И., Редько С.Ф. Эволюции областей притяжения в нелинейной несимметричной системе Дуффинга. Докл. АН Украины, 1991, № 11, с.21-24.
4. Kazakevitch M.I. Chaos in aeroelastic systems. American-Russian-Ukrainian Conf. on Chaos. Ed. David K. Campbell, Kiev, 1992.
5. Казакевич М.И. Хаос в аэроупругих системах – хаотические колебания. В Сб. «Воздействия ветра на здания и сооружения, возводимые в горных районах». Тбилиси, 1991, с.73-80.
6. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи / Е.В.Горохов, М.И. Казакевич, С.В.Турбин, Я.В.Назим; Под ред. Е.В.Горохова. – Донецк, 2005. – 348с.
7. Казакевич М.И. Аэродинамика мостов. – М.: Транспорт, 1987. – 240с.
8. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 312с.
9. Lorenz E.N. Deterministic Non-Periodic Flow. J. Atmos. Sci., 1963, v.20, p. 130-141.
10. Kobayashi S. Two-dimensional Panel Flatter. 1. Simply Supported Panel. Trans. Japan Society Aeronautical Space Sciences. 1962, v.5, № 8, p. 90-102.
11. Marsden J. Attempts to relate the Navier-Stokes equations to turbulence, in "Turbulence Seminar", Lecture Notes in Mathematics, 615, 1977.
12. Мельников В.К., Саясов Ю.С. Теория захвата частиц в синхронный режим ускорения с учетом неконсервативности уравнений движения. Препринт Института Объединенных Ядерных Исследований (Лаборатория теоретической физики), P-101, Дубна, 1958. -20 с. См. также ЖТФ, XXX, вып. 6, 1960, с. 656-664.
13. Мельников В.К. Об устойчивости центра при малых периодических возмущениях. Препринт ИОЯИ (Лаборатория теоретической физики), P-737, Дубна, 1961. -45 с.
14. Wiggins S., Holmes P. Homoclinic orbits in slowly varying oscillator. SIAM, J. of Math. Analysis. 1987, vol.18, p. 612-629.
15. Simin E., Franczek M. Melnikov based open-loop control for a class of nonlinear system. Proc. Design Eng. Tech. Conf. ASME "Symp. on Vibr. And Control of Stochastic Dyn. Systems". L.A. Bergman, ed. ASME, New-York. 1995, p. 897-902.
16. Казакевич М.И., Волкова В.Е. Динамика систем с двумя потенциальными ямами. – Днепропетровск: ГИД, Арт – Пресс, 2000. – 160с.
17. Казакевич М.И., Графский И.Ю., Редько С.Ф. Идентификация ультрагармонических автоколебаний при аэродинамической интерференции тандема круговых цилиндров в скошенном потоке. Докл. АН УССР. Сер. А., Физ.-мат. и техн. науки, 1985, № 4, с.27-30.

Казакевич Михайло Исаакович, заслуженный діяч науки і техніки України, професор кафедри «Мости» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. Дійсний член Транспортної академії України. Член Української Асоціації з металевих конструкцій. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, динаміка і аеродинаміка будівельних конструкцій.

Казакевич Михаил Исаакович, заслуженный деятель науки и техники Украины, профессор кафедры «Мосты» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Действительный член Транспортной академии Украины. Член Украинской Ассоциации по металлическим конструкциям. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, динамика и аэродинамика строительных конструкций.

Kazakevych Mykhaylo Isaakovych is an Honored worker of science and engineering of Ukraine, professor of the «Bridges» Department at Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. He is a member of the Transport academy of Ukraine, a member of the Ukrainian Association of Metal Structures. Scientific interests: operating reliability of metal structures, dynamics and aerodynamics of structures.