

Оценка сооружений на возникновение галопирования

Д.т.н., профессор Ю.Л. Рутман;
аспирант В.А. Мелешко*

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Ключевые слова: аэродинамическая неустойчивость; оценка на галопирование; критерий Глауэрта-Ден-Гартога

1. Галопирование – это автоколебания упругой системы в ветровом потоке (аэроупругие колебания). Оно характерно для гибких сооружений с особыми формами поперечного сечения, например такими, как прямоугольные или D-образные. При галопировании в таких сооружениях возможны колебания с большими амплитудами в перпендикулярном потоку направлении (в 10 или даже в значительно большее число раз превышающими размеры самого сечения в этом направлении) при частотах, которые значительно ниже частот срыва вихрей, характерных для того же самого сечения. Галопирование необходимо учитывать при проектировании различного рода сооружений (труб, мачт, линий электропередач, высотных зданий и мостов). Существующие в настоящее время методы расчета сложно реализовать. Это связано с необходимостью получения большого количества аэродинамических параметров, используемых в аэроупругих моделях. Поэтому разработка методик по применению современных вычислительных средств для расчета сооружений на возникновение галопирования актуальна для строительства.

Как указано в [1], методы расчета галопирования сложны и для исследования этого явления обычно требуются испытания в аэродинамической трубе [2,3]. Скорость ветрового потока, при превышении которой возможно галопирование, указана в европейских нормах [1]. Однако для вычисления этой критериальной скорости нужно знать коэффициент неустойчивости сечения. Этот коэффициент определен только для простейших сечений. Кроме того, знание критериальной скорости позволяет лишь установить возможность появления галопирования, а не установить конкретные условия его появления.

2. Ниже установлен критерий возможности возникновения галопирования в сооружениях, моделируемых балочными схемами, и предложена методика определения аэродинамических параметров, необходимых для использования этого критерия. Предложенный критерий обобщает известную формулу Глауэрта-Ден-Гартога [4], полученную для системы с одной степенью свободы.

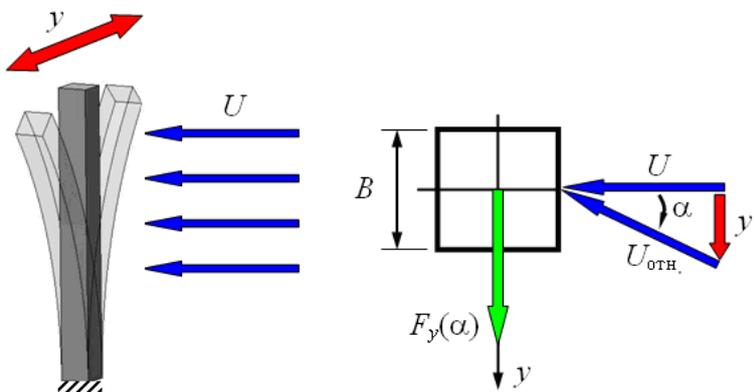


Рисунок 1. Силы и скорости при галопировании

Следуя [4], запишем выражения для распределенной по сооружению нагрузки, действующей в поперечном по отношению к ветровому потоку направлении (рис. 1):

$$F_y(z, t) = C_{Fy}(z) \cdot \left[-\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U(z) \cdot B(z) \right] \cdot y', \quad (1)$$

$$C_{Fy}(z) = \left(\frac{dC_L(z, \alpha)}{d\alpha} + C_D(z, \alpha) \right) \Big|_{\alpha=0}, \quad (2)$$

где $U(z)$ – средняя скорость ветрового потока на высоте z ;

$B(z)$ – поперечный (по отношению к потоку) размер сооружения;

ρ – плотность воздуха;

$y'(z, t)$ – скорость сечения в направлении, перпендикулярном потоку;

z – продольная координата сооружения;

Рутман Ю.Л., Мелешко В.А. Оценка сооружений на возникновение галопирования

C_L – коэффициент подъемной силы;

C_D – коэффициент лобового сопротивления;

α – угол между вектором скорости ветрового потока и вектором скорости сечения (эффективный угол атаки).

Функция $U(z)$ в (1) описывается формулой [5]:

$$U(z) = U_{10} \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^\beta, \quad (3)$$

где U_{10} – средняя скорость ветрового потока на высоте 10 м;

β – коэффициент, зависящий от типа местности.

Формула (1) может быть использована, когда сооружение описывается балочной моделью. Поэтому далее употребляется термин «балка» вместо термина «сооружение».

Обозначим через $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots$ собственные частоты моделирующей сооружение балки, соответствующие ее колебаниям по оси y . Через $\varphi_1(z), \varphi_2(z), \dots, \varphi_i(z), \dots$ и $q_1(t), q_2(t), \dots, q_i(t), \dots$ обозначим соответствующие этим частотам собственные формы и главные координаты. Тогда можно использовать разложение $y(z, t)$ по собственным формам:

$$y(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} q_i(t) \cdot \varphi_i(z), \quad (4)$$

где $q_i(t)$ есть решение уравнений [1]:

$$m_i \cdot q_i'' + 2 \cdot m_i \cdot \zeta \cdot \omega_i \cdot q_i' + c_i \cdot q_i = \int_0^L F_y(z, t) \cdot \varphi_i(z) dz, \quad (5)$$

$$m_i = \int_0^L \mu(z) \cdot \varphi_i^2(z) dz, \quad (6)$$

$$c_i = m_i \cdot \omega_i^2, \quad (7)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$;

$\mu(z)$ – погонная масса балки;

L – длина балки;

ζ – безразмерный коэффициент затухания;

m_i, c_i – обобщенные массы и жесткости.

Так как из (4) следует, что

$$y'(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} q_i'(t) \cdot \varphi_i(z) dz, \quad (8)$$

то с учетом (1),

$$\int_0^L F_y(z, t) \cdot \varphi_i(z) dz = \sum_{k=1}^{\infty} \beta_{ik} q_k'(t), \quad (9)$$

где

$$\beta_{ik}(z, t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \int_0^L C_{Fy}(z) \cdot U(z) \cdot B(z) \cdot \varphi_k(z) \cdot \varphi_i(z) dz. \quad (10)$$

Таким образом, вместо (5) получаем:

$$m_i \cdot q_i'' + 2 \cdot m_i \cdot \zeta \cdot \omega_i \cdot q_i' + \sum_{k=1}^{\infty} \beta_{ik} q_k'(t) + c_i \cdot q_i = 0. \quad (11)$$

Если пренебречь высшими собственными формами и учесть только n первых форм (что практически неизбежно), то получим n уравнений:

$$m_i \cdot q_i'' + 2 \cdot m_i \cdot \zeta \cdot \omega_i \cdot q_i' + \sum_{k=1}^n \beta_{ik} q_k'(t) + c_i \cdot q_i = 0, \quad (12)$$

$i = 1, 2, \dots, n.$

Галопирование произойдет, если система (12) имеет неустойчивые решения. Заключение об устойчивости решений уравнений (12) делается, исходя из анализа соответствующего этой системе характеристического уравнения:

$$\begin{vmatrix} \left[\lambda^2 \cdot m_1 + \lambda \cdot (2 \cdot m_1 \cdot \zeta \cdot \omega_1 + \beta_{11}) + C_1 \right] & \lambda \cdot \beta_{12} & \dots & \lambda \cdot \beta_{1n} \\ \lambda \cdot \beta_{21} & \left[\lambda^2 \cdot m_2 + \lambda \cdot (2 \cdot m_2 \cdot \zeta \cdot \omega_2 + \beta_{22}) + C_2 \right] & \dots & \lambda \cdot \beta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda \cdot \beta_{n1} & \lambda \cdot \beta_{n2} & \dots & \left[\lambda^2 \cdot m_n + \lambda \cdot (2 \cdot m_n \cdot \zeta \cdot \omega_n + \beta_{nn}) + C_n \right] \end{vmatrix} = 0. \quad (13)$$

Определитель в левой части (13) получается, если решение (11) искать в виде

$$q_i(t) = A_i \cdot e^{\lambda \cdot t}. \quad (14)$$

Решение (11) будет неустойчивым, если оно соответствует корню уравнения (13) λ_j с положительной вещественной частью:

$$\operatorname{Re} \lambda_j > 0. \quad (15)$$

Условие (15) является обобщенным условием Глауэрта–Ден-Гартога.

Если учитывать только первую форму колебаний, то

$$\lambda_{1,2} = \frac{(-2 \cdot m_1 \cdot \zeta \cdot \omega_1 - \beta_{11}) \pm \sqrt{(2 \cdot m_1 \cdot \zeta \cdot \omega_1 + \beta_{11})^2 - 4 \cdot m_1 \cdot c_1}}{2 \cdot m_1}. \quad (16)$$

Из (16) следует, что неустойчивость может возникнуть, если

$$\beta_{11} < 0. \quad (17)$$

Для однородной балки, в которой

$$C_{Fy}(z) = \text{const}, \quad (18)$$

условие (17) совпадает с критерием Глауэрта–Ден-Гартога.

3. Из вышеприведенных рассуждений и выкладок следует, что для вычисления критерия, определяющего возможность появления галопирования, принципиальным является определение $C_D(\alpha)$ и

$\frac{dC_L(\alpha)}{d\alpha}$ как функций угла атаки α . Методика определения этих параметров с помощью пакета ANSYS CFX

состоит из следующих этапов:

- 1) построение конечно-объемной модели воздушной среды вокруг обтекаемого сооружения;
- 2) выбор модели турбулентности;
- 3) задание граничных условий на поверхности среды;
- 4) определение начальных условий;
- 5) расчет;
- 6) определение аэродинамических параметров.

При расчете в программах вычислительной гидродинамики [6,7] основными проблемами являются выбор размеров воздушного пространства и сеточная дискретизация. Использование недостаточного воздушного пространства вокруг обдуваемого тела и некорректное сеточное разрешение могут привести к неправильному результату. Далее описан порядок выбора этих параметров и определение сил сопротивления на примере обтекания обледенелого провода ветровым потоком в программе вычислительной гидродинамики (CFD) – CFX.

В расчете бала применена двухпараметрическая модель турбулентности Ментера Shear Stress Transport (SST) с пристенной функцией Automatic Near-Wall Treatment [8], которая учитывает обратный градиент давления [10] и места отрыва на кривых поверхностях. Кроме того, модель не требует высокого сеточного

Рутман Ю.Л., Мелешко В.А. Оценка сооружений на возникновение галопирования

разрешения ($Y^+ < 200$), как $k-\omega$ ($Y^+ < 2$) [8,9]. Количество элементов в пограничном слое должно быть не меньше 10. Задача была решена в стационарном режиме (Steady State), что позволило сильно сократить время расчета.

Для использования модели SST необходимы следующие начальные параметры: кинетическая энергия k и диссипация энергии ε .

Кинетическая энергия k ветрового потока определена по формуле [8]:

$$k = \frac{3}{2} \cdot I^2 \cdot U^2, \quad (19)$$

где U – средняя скорость ветра, м/с; I – интенсивность турбулентности.

Интенсивность турбулентности есть отношение среднеквадратического отклонения пульсационной составляющей к средней скорости ветра [4]:

$$I = \frac{\overline{u}(f)}{U}. \quad (20)$$

Интенсивность турбулентности для установившегося (развитого) турбулентного течения жидкости в канале [11]:

$$I = 0,18 \cdot \text{Re}^{-\frac{1}{8}}. \quad (21)$$

Для аэродинамической трубы $I=0,05\%$ [11].

Скорость диссипации является скоростью переноса кинетической энергии турбулентности к мельчайшим вихрям (хотя реальный процесс диссипации происходит в мельчайших вихрях). Следовательно, она определяется свойствами крупных вихрей и, таким образом, масштабами k и l_t [9]. Величина объектов, стоящих на пути воздушного потока, определяет начальные размеры вихрей турбулентности. Чем больше преграда, тем больше вихри, но они могут быстро разделиться на более мелкие. Обычно объект создает начальный вихрь в 1/7-1/10 своего размера. Скорость диссипации энергии ε определена по формуле [8]:

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l_t}, \quad (22)$$

где l_t – вихревой масштаб.

Для задач внешнего обтекания l_t обычно принимают равным $0,1D$.

Вокруг обтекаемого тела образуется пограничный слой. Толщину пограничного слоя δ можно приближенно оценить по формуле [8]:

$$\delta = 0,035 \cdot L \cdot \text{Re}_L^{-\frac{1}{7}}. \quad (23)$$

Если не используется пристенная функция Automatic Near-Wall Treatment [8], то расстояние от стенки до первого узла сетки $dy(Y^+)$ можно определить по формуле [8]:

$$dy(Y^+) = D \cdot (Y^+) \cdot \sqrt{80} \cdot \text{Re}^{-\frac{13}{14}}, \quad (24)$$

где D – поперечный размер здания, м;

Y^+ – безразмерное расстояние ($Y^+ < 200$, для модели турбулентности SST, $20 < Y^+ < 100$, для модели турбулентности $k-\varepsilon$);

Re – число Рейнольдса.

4. Рассмотрим применение этой методики. В качестве исследуемого объекта был принят обледенелый провод с площадью сечения 150 мм^2 . На рис. 2 показана схема обледенелого провода [12] с характерным размером поперечного сечения ($D=0,025$ м) и направлениями вращения вокруг центра масс O . Область воздушной среды в 20 раз больше объекта по ширине, в 40 раз по длине.

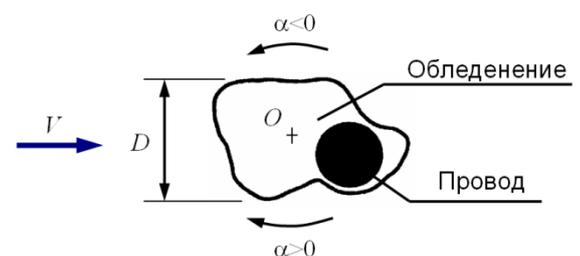


Рисунок 2. Схема вращения обледенелого провода

В модели были приняты следующие граничные условия:

- на входе в расчетную область задана скорость потока U , интенсивность турбулентных пульсаций I и масштаб турбулентности l_t (принято $l_t = 0,1D$, $I = 1\%$, $U = 2$ м/с);
- на выходе из расчетной области – условие постоянства давления $p=p_\infty$;
- на нижней, верхней и внешних боковых границах – условие аэродинамической гладкой стенки (вектор скорости параллелен боковой границе расчетной области);
- на внутренней границе (по периметру сечения провода) – условие прилипания (нулевая скорость), со сшивкой профилей скорости при помощи пристеночных функций.

На рис. 3 представлена конечно-объемная модель обдуваемого объекта.

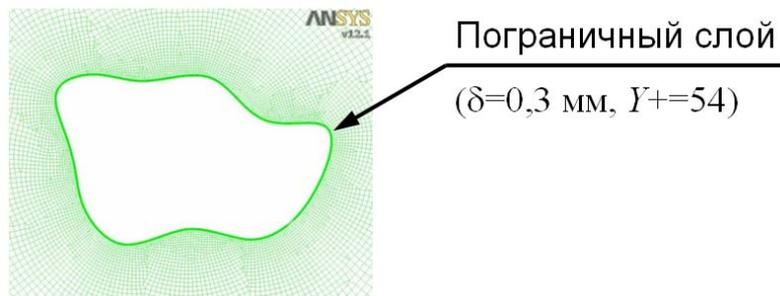


Рисунок 3. Конечно-объемная модель обдуваемого объекта

На рис. 4-7 представлены результаты расчета.

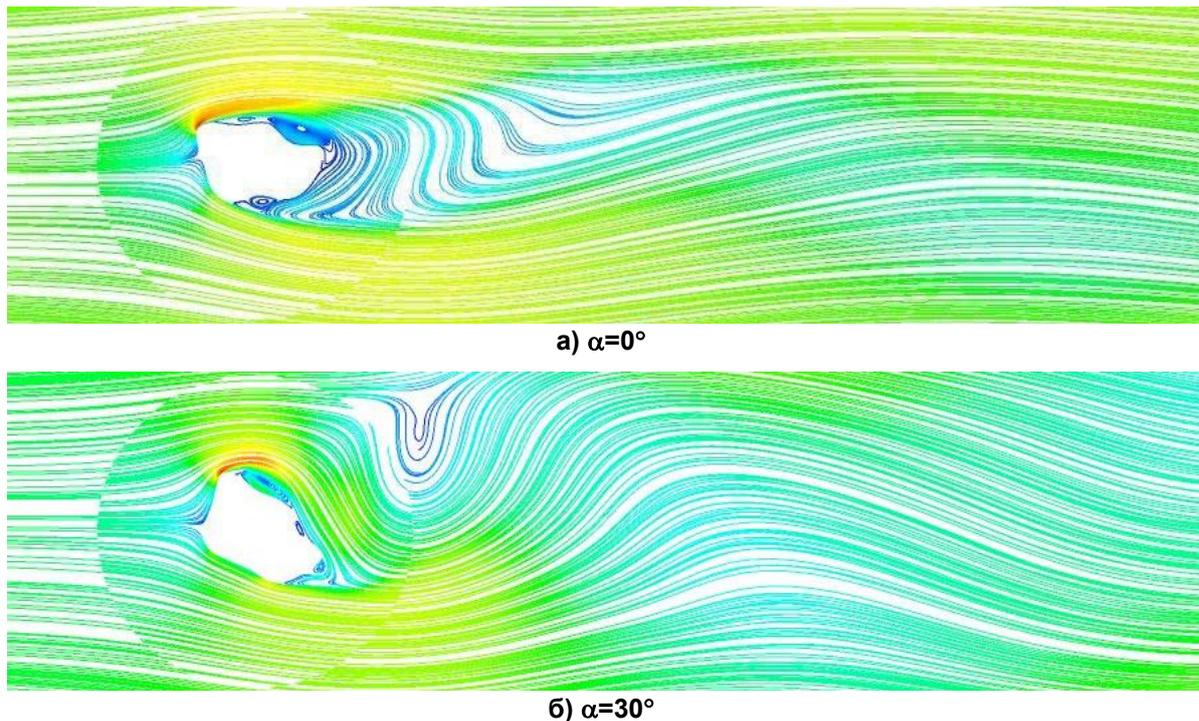


Рисунок 4. Линии тока скорости

После интегрирования давления по поверхности были получены средние силы и коэффициенты лобового и бокового сопротивления.

Коэффициент лобового сопротивления определяется по формуле:

$$C_X = \frac{F_{CFX}}{F_{cp}} = \frac{2 \cdot \int p ds}{\rho \cdot V^2 \cdot A}, \quad (25)$$

$$A = D \cdot S, \quad (26)$$

где $S=0,3$ мм – толщина конечного элемента.

Получив зависимости C_y и C_x от угла атаки, можно их аппроксимировать многочленом в MathCad (функции – regress, linfit). Также можно интерполировать ряд значений кубическим сплайном (функции – interp, cspline). В данном случае зависимости были аппроксимированы:

$$y := \text{regress}(\beta, C_y, k), \tag{27}$$

$$x := \text{regress}(\beta, C_x, k), \tag{28}$$

$$C_L(\alpha) := \text{interp}(y, \beta, C_y, \alpha), \tag{29}$$

$$C_D(\alpha) := \text{interp}(x, \beta, C_x, \alpha), \tag{30}$$

где β – угол вращения, *rad*; α – аргумент интерполяционной функции, *rad*; $k=20$ – степень.

В результате были образованы функции $C_L(\alpha)$ и $C_D(\alpha)$. Продифференцировав многочлен, можно найти производную $dC_L(\alpha)/d\alpha$ и применить условие Ден-Гартога.

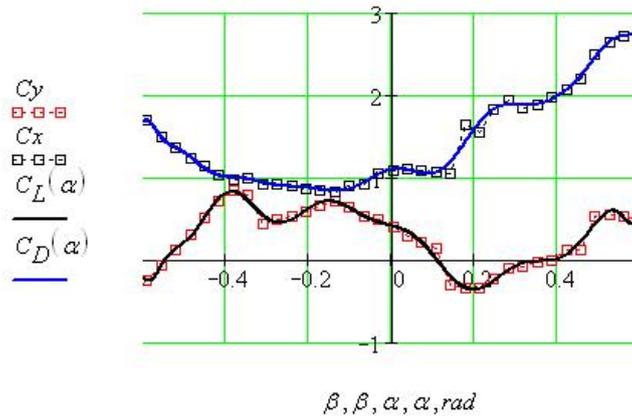


Рисунок 5. Зависимости C_y и C_x от угла атаки и функции $C_L(\alpha)$ и $C_D(\alpha)$

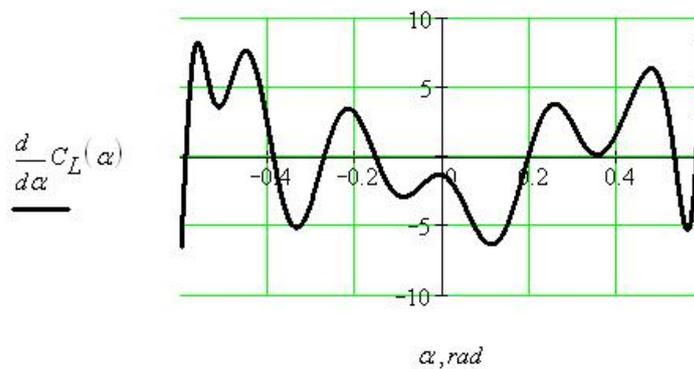


Рисунок 6. Производная функции $C_L(\alpha)$

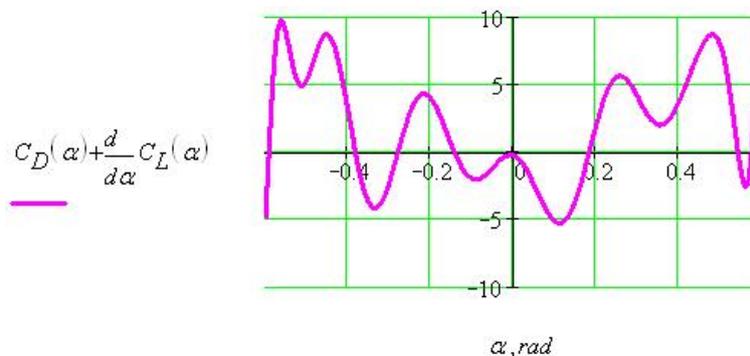


Рисунок 7. Сумма функции $C_D(\alpha)$ и производной функции $C_L(\alpha)$

Галопирование возможно в интервале $(-0,15; 0,19)$, так как здесь функция отрицательная (рис. 7).

Подставим полученные результаты в обобщенное условие Глауэрта–Ден-Гартога:

$$2 \cdot m_1 \cdot \zeta \cdot \omega_1 + \beta < 0. \tag{31}$$

Представим первую форму колебаний провода в виде:

$$\phi_1(z) = \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{L}\right), \quad (32)$$

где $k=1$.

Тогда для провода длиной $L=100$ м, массой $m=125$ кг, коэффициентом затухания $\zeta=0,024$ и частотой $f_1=0,86$ Гц (при малых колебаниях провода его частота близка к частоте идеальной (невесомой и туго натянутой) струны), обобщенная масса и параметр β_1 при скорости ветра, например 6 м/с, будут равны соответственно:

$$m_1 = \int_0^L \frac{m}{L} \phi_1(z)^2 dz = 62,5 \text{ кг}, \quad (33)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{Fy} \cdot B \cdot U \cdot \int_0^L \phi_1(z)^2 dz = -22,875, \quad (34)$$

где $C_{Fy}=-5$ – аэродинамический параметр сечения (рис. 7).

Подставив эти значения в обобщенное условие Глауэрта–Ден-Гартога, получим:

$$2 \cdot 62,5 \cdot 0,024 \cdot 0,2 \cdot 2 \cdot \pi - 22,875 = -6,673 < 0, \quad (35)$$

следовательно галопирование провода с принятыми характеристиками возможно.

Следует подчеркнуть, что эта оценка не позволяет определить реальное поведение конструкции (частоту автоколебаний, амплитуду), а дает установить только возможность появления галопирования.

Полученные результаты согласуются с результатами, приведенными в диссертации [13].

Выводы

1. В статье предложен обобщенный критерий Глауэрта–Ден-Гартога с учетом формы колебаний и изменения скорости ветра по высоте.
2. Предложена методика определения аэродинамических параметров сооружения как функций угла атаки.
3. Использование предложенной методики позволяет проводить анализ возможности появления галопирования за время, приемлемое для практических расчетов.

Литература

1. Бирбраер А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 594 с.
2. Mendis P., Ngo T., Haritos N., Hira A. Wind loading on Tall Buildings // EJSE. 2007. Special Issue: Loading on Structures. P. 41-54.
3. Гузев А.С., Короткин А.И., Лебедев А.О., Роговой Ю.А. Анализ некоторых результатов по определению аэродинамических характеристик высотных зданий // Инженерно-строительный журнал. 2009. №3. С. 50-52.
4. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения / Пер. с англ. и редакция Б. Е. Маслова. М. : Стройиздат, 1984. 360 с.
5. Попов Н.А. Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки / ГУП ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко, ООО «ЕВРОСОФТ». М., 1999. 26 с.
6. Гувернюк С.В., Гагарин В.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий // АВОК. 2007. №1. С. 16-22.
7. Гиргидов А.А. Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D® как средство его реализации // Инженерно-строительный журнал. 2011. №3(21). С. 21-27.
8. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2009. 257 p.
9. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений. СПб. : БГТУ, 2001. 108 с.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974. 711 с.
11. ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2009. 1450 p.
12. Бучинский В. Е. Атлас обледенения проводов. Л. : Гидрометеиздат, 1966. 114 с.
13. Марчевский И. К. Математическое моделирование обтекания профиля и исследование его устойчивости в потоке по Ляпунову: дис. ... канд. ф.-м. наук : 01.02.05. М. , 2008. 119 с.

* Владимир Аркадьевич Мелешко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)748-07-16; эл. почта: vl-meleshko@yandex.ru

Estimation the structure on galloping fluctuation possibility

Yu.L. Rutman;

V.A. Meleshko,

Saint-Petersburg State University of Architecture and civil engineering, Saint-Petersburg, Russia

+7(921)748-07-16; e-mail: vl-meleshko@yandex.ru

Key words

aerodynamical instability; galloping estimation; Glowrt-Den-Gartog criterion

Abstract

Galloping is self-oscillations of elastic system in wind flow (aeroelastic vibrations). The galloping should be taken into account when designing different structures (pipes, masts, power lines, high-rise buildings, bridges). Existing calculation methods are difficult to realize.

Generalized Glowrt-Den-Gartog criterion taking into account mode shape and wind speed instability all along height is offered. ANSYS CFX program for determination the aero dynamical coefficients is used. Functions for approximation and interpolation of aero dynamical coefficients as functions of wind angle of attack are offered.

The use of obtained results for calculation of Glowrt-Den-Gartog criterion and determination of galloping fluctuation possibility are shown.

References

1. Birbraer A. N. *Ekstremalnye vozdeystviya na sooruzheniya* [Extreme actions on buildings]. Saint-Petersburg : Izd-vo Politekh. un-ta, 2009. 594 p.
2. Mendis P., Ngo T., Haritos N., Hira A. Wind loading on Tall Buildings. *EJSE*. 2007. Special No.: Loading on Structures. Pp. 41-54.
3. Guzeev A. S., Korotkin A. I., Lebedev A. O., Rogovoy YU. A. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 3. p. 50-52.
4. Simiu E., Skanlan R. *Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya* [Wind actions on buildings and structures]. Moscow : Sroyizdat, 1984. 360 p.
5. Popov N. A. *Rekomendatsii po utochnennomu dinamicheskomu raschetu zdaniy i sooruzheniy na deystvie pulsatsionnoy sostavlyayushchey vetrovoy nagruzki* [Guidelines on specified dynamic calculation of buildings and structures on wind load pulse component action] / GUP TSNIISK imeni V.A. Kucherenko, OOO «EVROSOFT». Moscow, 1999. 26 p.
6. Guvernyuk S. V., Gagarin V. G. *AVOK*. 2007. No. 1. Pp. 16-22.
7. Girgidov A. A. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 3(21). p. 21-27.
8. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2009. 257 p.
9. Belov I. A., Isaev S. A. *Modelirovanie turbulentnykh techeniy* [Modeling of turbulent flows]. Saint-Petersburg : BGU, 2001. 108 p.
10. Shlikhting G. *Teoriya pogranchnogo sloya* [Boundary-layer theory]. Moscow : Nauka, 1974. 711 p.
11. *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2009. 1450 p.
12. Buchinskiy V. E. *Atlas obledeneniya provodov* [Atlas of ice formation on conductors]. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1966. 114 p.
13. Marchevskiy I. K. *Matematicheskoe modelirovanie obtekaniya profilya i issledovanie ego ustoychivosti v potoke po Lyapunovu* [Mathematic simulation of profile streamline and research its stability in flow according to Lyapunov]: theses. Moscow, 2008. 119 p.

Full text of this article in Russian: pp. 5-11