Строительная механика и расчет сооружений

УДК 624.04

© Р. Н. Гузеев, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: guzeev.roman@gmail.com

© Е. С. Головизнина, инженер
(АО «Институт Гипростроймост Санкт-Петербург»,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: ekaterina.kotlarova@spb.gpsm.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-3-79-86

© R. N. Guzeev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: guzeev.roman@gmail.com

© E. S. Goloviznina, engineer
(JSC «Institute Giprostroymost Saint Petersburg»,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: ekaterina.kotlarova@spb.gpsm.ru

ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ИХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

EFFECT OF STRUCTURAL INTERACTION ON THE AERODYNAMIC PROPERTIES

Рассматривается взаимное влияние элементов конструкций на аэродинамический коэффициент лобового сопротивления. Численные исследования выполнены с использованием метода дискретных вихрей. Получены зависимости взаимного влияния прямоугольных сечений с различным соотношением сторон в зависимости от приведенного расстояния между ними на их аэродинамику. Рассмотрено взаимное влияние стоек пилонов вантовых мостов на примере Золотого моста и Русского моста во Владивостоке.

Ключевые слова: аэродинамический коэффициент, вантовые мосты, ветровая нагрузка, метод дискретных вихрей, компьютерная динамика жидкости.

Effect of structural interaction on drag coefficient is considered. Numerical study is performed using discrete vortex method. There have been obtained dependences of the mutual influence of rectangular cross sections with different aspect ratios depending on the reduced distance between the cross sections, on their aerodynamics. The effect of structural interaction of cable-stayed bridge pylon legs is investigated on the examples of Golden Bridge and Russian Bridge in Vladivostok.

Keywords: drag coefficient, cable-stayed bridge, wind load, discrete vortex method, computational dynamics of fluid flow.

В большинстве норм при определении ветровой нагрузки на сооружения приведены аэродинамические коэффициенты для отдельных элементов и не учитывается взаимное влияние соседних частей конструкции. Например, аэродинамические коэффициенты для прямоугольных поперечных сечений приведены в Eurocode 1991-1-4 и СП 20.13330.2016. Для поперечных сечений и строительных конструкций аэродинамические коэффициенты и ветровые нагруз-

ки могут быть также определены в результате исследований в аэродинамической трубе [1–3]. Вопросам определения ветровых нагрузок на мостовые конструкции и определения их аэродинамических свойств посвящены работы [4–9].

В мостостроении часто возникает необходимость определения ветровой нагрузки для элементов стоек пилонов [2, 5, 6]. При этом необходимо учитывать их взаимное влияние на величины аэродинамических коэффициентов

[8, 9], так как при определенном взаимном положении части сечения могут подвергаться большей по значению ветровой нагрузке или иметь ее противоположную направленность в отличие от рекомендаций норм.

Целью данной работы является выявление зависимости аэродинамических коэффициентов от взаимного положения частей составного сечения для стандартных прямоугольных сечений и проверка применимости выдвинутых предположений на примере реально существующих объектов — пилонов Русского и Золотого мостов (Владивосток, Россия). Оба пилон состоят из двух стоек, расстояние между которыми, а также их геометрические размеры изменяются с высотой.

Численные методы определения аэродинамических свойств строительных конструкций методами компьютерной динамики жидкостей (CFD) широко используются в научных и практических целях [5, 10]. Для призматических мостовых конструкций хорошо зарекомендовал себя метод дискретных вихрей [7, 9]. В настоящей работе исследование аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления проводится средствами CFD с использованием метода дискретных вихрей.

Основной задачей является определение зависимости аэродинамических коэффициентов от расстояния между элементами конструкций пилонов.

В рамках исследования стандартных прямоугольных сечений было рассмотрено три принципиальные расчетные схемы:

1. Схема А — сечение из двух вертикальных прямоугольников (соотношение сторон $b:h = 1:5$).
2. Схема Б — сечение из двух квадратов ($b:h = 1:1$).
3. Схема В — сечение из двух горизонтальных прямоугольников ($b:h = 5:1$).

Сначала для калибровки CFD-моделей были определены значения аэродинамического коэффициента C_d^0 для одиночных элементов прямоугольного сечения. Полученные значения сравнивались с нормативными, погрешность определения аэродинамических коэффициентов составила не более 10 %.

Затем определялись коэффициенты C_d для схем А–В. В каждой схеме рассматривалось вза-

имное расположение сечений на расстояниях S . Величина S менялась от h до $12h$. Для каждой группы сечений строились графики зависимости C_d / C_d^0 от отношения S/h . На рис. 1 приведены схемы сечений и результаты для каждой из схем.

Как видно из графика, для наветренной части сечения схемы А влияние подветренной части незначительное. Наблюдается небольшое, до 15 %, увеличение лобового сопротивления до величины $S/h = 3$, затем значение аэродинамического коэффициента снижается и далее незначительно отличается от соответствующего коэффициента для одиночного сечения. Подобное поведение хорошо согласуется с результатами, полученными в [11].

Подветренная часть схемы А подвергается существенному влиянию наветренной, вплоть до расстояния $12h$ отношение C_d / C_d^0 не достигает значения 1,0, т. е. нагрузки на эту часть меньше нормативных. На расстояниях до $3h$ из-за повышенной турбулентности потока, обтекающего наветренную часть, распределение давления по поверхности наветренной части (рис. 2, а) отличается от стандартного (рис. 2, б), что может приводить даже к изменению направления воздействия на противоположное (случай при $S = 3h$). При больших расстояниях между сечениями наблюдается более спокойное течение потока перед подветренной частью и поэтому распределение давлений на каждой из частей сечения схоже между собой.

Для наветренной части сечения расчетной схемы Б получены результаты, аналогичные результатам для расчетной схемы А: значение аэродинамического коэффициента для наветренной части повышается не более чем на 10 % при расстояниях в свету до $3h$, а затем приближается к нормативным значениям.

Для подветренной стороны схемы Б, несмотря на отличия в графиках, принципиальная картина распределения давлений аналогична показанной на рисунках для схемы А. При расстояниях между частями сечения до $2h$ наблюдается давление, направленное внутрь подветренного сечения с его левой и правой сторон, что объясняет низкое значение коэффициента (до 30 % от одиночного). Далее, в зависимости от поведения турбулентного потока, изменяется размер зоны

Рис. 1. Схемы сечений и зависимость C_d/C_d^0 от отношения S/h для каждой из схем

пониженного давления позади подветренной части и, как следствие, — величина и направление давления, которые и определяют колебания коэффициента при расстояниях более $2h$. Наибольшая величина коэффициента наблюдается при расстоянии $3h$.

Поперечные сечения, удлиненные в направлении движения потока воздуха, испытывают

значительно меньшее ветровое давление за счет небольших размеров зоны пониженного давления позади сечения. В расчетной схеме В для наветренной стороны при расстоянии между частями сечения в свету до $6h$ наблюдается снижение аэродинамического коэффициента за счет взаимного влияния частей сечения. Узкий ветровой поток между частями ограничен в своем

Рис. 2. Распределение давлений для расчетных схем А и В: а — схема А, расстояние между частями сечения в свету $S/h < 3$; б — схема А, расстояние между частями сечения в свету $S/h > 3$; в — схема В, расстояние между частями сечения в свету $S/h < 6$

свободном перемещении и почти не оказывает воздействия на заднюю стенку наветренной части (рис. 2, в). При расстояниях более $6h$ такого эффекта не наблюдается и коэффициент приближается к значению, полученному для одиночного сечения.

Аналогично рассмотренным ранее схемам, подветренная часть сечения схемы В вплоть до расстояния $6h$ не имеет у своей задней стенки давления, направленного от сечения, что снижает значение аэродинамического коэффициента относительно нормативного (максимальная

величина 87 % при расстоянии $6h$). Далее такое давление появляется, и от его величины зависит аэродинамический коэффициент.

Затем был проведен численный анализ взаимного влияния стоек пилона для вантового моста на о. Русский во Владивостоке (Русского моста). Рассматривались сечения, расположенные на пяти уровнях (рис. 3, а).

Сечения пилона Русского моста по отношению сторон приближаются к квадратам, рассматриваемым выше, отношение b/h варьируется от 0,65 (сечение 1) до 0,94 (сечение 5). Отношение

Рис. 3. Пилон Русского моста: а — внешний вид пилоны и расположение расчетных сечений по высоте; б — принципиальная схема поперечного сечения; в — график зависимости C_d / C_d^0 от S/h при поперечном и продольном направлении ветра относительно моста; г — схема распределения давления, одиночное сечение; д — мгновенное давление, сечение 1, расстояние в свету $S/h = 2,6$; е — мгновенное давление, сечение 5, расстояние в свету $S/h = 0,43$

S/h находится в диапазоне от 2,60 (сечение 1) до 0,43 (сечение 5). Внешний вид сечения показан на рис. 3, б.

Для каждого из сечений расчет проводился сначала отдельно для левой части — для определения коэффициента C_d^0 , а затем для двух частей

одновременно определялась величина C_d . Затем строился график зависимости C_d / C_d^0 от S/h (рис. 3, в).

На графике зависимости аэродинамических коэффициентов от расстояния между частями сечения в свету для пилоны Русского моста вид-

но, что подветренная стойка пилона оказывается под сильным влиянием наветренной, значение нагрузки на нее ниже, чем на наветренную стойку, на 30 %. Кроме того, наблюдается изменение знака ветрового воздействия для верхней зоны пилона, где отношение S/h минимально. Для наветренной стойки при соотношении S/h около 2 ветровое давление выше на 15 %, чем для одиночного сечения.

На рис. 3, г показана схема распределения давлений для одиночного сечения, на рис. 3, д, е — на стойки пилона Русского моста при их взаимном влиянии друг на друга.

В данном случае отношение S/h не превышает 3 и на подветренную часть со всех сторон оказывается прижимающее (направленное внутрь сечения) давление. Это полностью совпадает с распределением давления, полученным для

Рис. 4. Пилон Золотого моста: а — внешний вид пилона и расположение расчетных сечений по высоте; б — принципиальная схема поперечного сечения; в — график зависимости C_d / C_d^0 от S/h для поперечного направления моста; г — схема распределения давления, одиночное сечение; д — мгновенное давление, сечение 1, расстояние в свету $S/h = 3,78$; е — мгновенное давление, сечение 5, расстояние в свету $S/h = 10,14$

стандартных сечений, так же как и повышение аэродинамического коэффициента для наветренной части при соотношении S/h около 2 (см. рис. 3, в).

Расчет для перпендикулярного направления ветра (вдоль пролетного строения) показал, что даже при наиболее близком расположении частей сечения их влияние друг на друга намного меньше (см. рис. 3, в). Тем не менее, наблюдается некоторое повышение C_d , на которое стоит обратить внимание при расчете пилонов аналогичной формы.

Далее был проведен анализ аэродинамических коэффициентов наклонных стоек пилона Золотого моста во Владивостоке [12]. Рассматривались пять сечений по высоте пилона (рис. 4, а). Внешний вид сечения показан на рис. 4, б.

Сечение пилона в зависимости от положения изменяется от вытянутого ($b/h = 1,79$) до равностороннего ($b/h = 1,09$) по соотношению габаритных размеров. Отношение S/h находится в пределах от 3,78 (сечение 1) до 10,14 (сечение 5). Однако данная форма сечения объективно отличается от прямоугольного и имеет распределение давления, отличное от стандартного, в частности наблюдается появление зоны пониженного давления у части передней грани для одиночной наветренной части (рис. 4, з).

На рис. 4, в показан график зависимости C_d / C_d^0 от S/h . Полученная зависимость C_d / C_d^0 позволяет оценить снижение ветровой нагрузки на подветренную стойку пилона. Наветренная сторона пилона почти не испытывает влияние подветренной.

Выводы

В результате проведенных численных экспериментов была выявлена зависимость влияния соседних конструктивных элементов на величину аэродинамических коэффициентов и соответственно на величину ветровой нагрузки.

Качественно результаты исследования для прямоугольных сечений применимы к реальным, более сложным сечениям пилонов вантовых мостов.

Существенное влияние частей сечения друг на друга наблюдается при направлении ветра перпендикулярно пролетному строению.

При направлении ветра вдоль пролетного строения влияние частей сечения друг на друга

незначительно даже при небольшом расстоянии между ними.

Полученные результаты, а также методика аэродинамических исследований могут быть использованы при проектировании пилонов вантовых мостов.

Библиографический список

1. Березин М. А., Катюшин В. А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. Новосибирск: Олден-полиграфия, 2003. 130 с.
2. Казакевич М. И. Ветровая безопасность сооружений. Теория и практика. М.: Август Борг, 2015. 288 с.
3. Popov N. A. Tornadoes and severe storms in Russia // Proceedings of the Conference on Natural Disaster Reduction. Washington, D.C.: ASCE, 1996. Pp. 301–307.
4. Erdem S., Yağmuroğlu İ., Saifullah K. Assessment of aerodynamic response of the Nissibi cable-stayed bridge using three-dimensional computational fluid dynamics // Chall. J. Struct. Mech. 2016. № 4. Pp. 196–204.
5. Elgohary M., Attia W. Bridge Pylons — Modeling and Design Under CFD Analysis // J. Al-Azhar Univ. Eng. Sect. 2017. Vol. 12, № 45. Pp. 1285–1294.
6. Казакевич М. И. Аэродинамика мостов. М.: Транспорт, 1987. 240 с.
7. Larsen A. Advances in aeroelastic analyses of suspension and cable-stayed bridges // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 1998. Vol. 74–76. Pp. 73–90.
8. Hui M. C. H., Larsen A., Xiang H. F. Wind turbulence characteristics study at the Stonecutters Bridge site: Part I — Mean wind and turbulence intensities // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. 2009. Vol. 97, № 1. Pp. 22–36.
9. Hejlesen M. M. et al. On estimating the aerodynamic admittance of bridge sections by a mesh-free vortex method // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. 2015. Vol. 146. Pp. 117–127.
10. Белостоцкий А. М., Акимов П. А., Афанасьева И. Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. М.: ACB, 2017. 720 с.
11. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1984. 360 с.
12. Koljusev I., Guzeev R., Maslov D. Engineering solutions for Golden Horn Bay bridge with V-shaped pylons // Long Span Bridges and Roofs — Development, Design and Implementation: 36th IABSE symposium. Kolkata, 2013. Pp. 188–189.

References

1. Berezin M. A., Katyushin V. A. Atlas aerodinamicheskikh kharakteristik stroitel'nykh

konstruktsiy [Atlas of the aerodynamic characteristics of building structures]. Novosibirsk, Olden-poligrafiya Publ., 2003, 130 p.

2. Kazakevich M. I. *Vetrovaya bezopasnost' sooruzheniy. Teoriya i praktika* [Wind safety of structures. Theory and practice]. Moscow, Avgust Borg Publ., 2015, 288 p.

3. Popov N. A. *Tornadoes and severe storms in Russia*. Proceedings of the Conference on Natural Disaster Reduction, Washington, D.C., ASCE Publ., 1996, pp. 301–307.

4. Erdem S., Yağmuroğlu İ., Saifullah K. Assessment of aerodynamic response of the Nissibi cable-stayed bridge using three-dimensional computational fluid dynamics. *Chall. J. Struct. Mech.*, 2016, no. 4, pp. 196–204.

5. Elgohary M., Attia W. Bridge Pylons — Modeling and Design Under CFD Analysis. *J. Al-Azhar Univ. Eng. Sect.*, 2017, vol. 12, no. 45, pp. 1285–1294.

6. Kazakevich M. I. *Aerodinamika mostov* [Bridge aerodynamics]. Moscow, Transport Publ., 1987, 240 p.

7. Larsen A. Advances in aeroelastic analyses of suspension and cable-stayed bridges. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1998, vol. 74–76, pp. 73–90.

8. Hui M. C. H., Larsen A., Xiang H. F. Wind turbulence characteristics study at the Stonecutters Bridge site: Part I — Mean wind and turbulence intensities. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, Elsevier Publ., 2009, vol. 97, no. 1, pp. 22–36.

9. Hejlesen M. M. et al. On estimating the aerodynamic admittance of bridge sections by a mesh-free vortex method. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, Elsevier Publ., 2015, vol. 146, pp. 117–127.

10. Belostotskiy A. M., Akimov P. A., Afanas'eva I. N. *Vychislitel'naya aerodinamika v zadachakh stroitel'stva* [Computational aerodynamics in the problems of construction]. Moscow, ASV Publ., 2017, 720 p.

11. Simiu E., Skanlan R. *Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya* [Impact of wind on buildings and structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 360 p.

12. Koljushev I., Guzeev R., Maslov D. *Engineering solutions for Golden Horn Bay bridge with V-shaped pylons*. Long Span Bridges and Roofs — Development, Design and Implementation: 36th IABSE symposium, Kolkata, 2013, pp. 188–189.