

Определение аэродинамических параметров навеса вокзала «Олимпийский парк». Физический и численный эксперименты

*К.т.н., инженер В.А. Мелешко;
аспирант У.Х. Хертек,*

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»;

к.т.н., с.н.с. Ю.А. Роговой,

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Аннотация. В данной статье рассмотрены результаты экспериментального и численного моделирования обтекания макета навесов здания вокзала «Олимпийский парк». Представлены результаты экспериментального исследования макета навесов вокзала.

При численных расчетах применена программа ANSYS CFX для моделирования течения воздуха и определения аэродинамических параметров. С использованием модели турбулентности SST решены уравнения Навье – Стокса. Дополнительно с помощью метода отсоединенных вихрей DES был проведен аэродинамический анализ.

В результате сравнения экспериментальных значений аэродинамических параметров моделей с численным экспериментом в программе ANSYS CFX было получено удовлетворительное соответствие.

Ключевые слова: навес вокзала; аэродинамическая труба; срыв вихрей; аэродинамические параметры; модели турбулентности

Введение

В настоящее время в практике проектирования различных элементов современных зданий и сооружений, навесов, а также фасадов зданий для учета аэродинамических нагрузок, действующих на указанные конструкции, все чаще применяются расчетные методы, основанные на использовании пакетов прикладных программ, таких как ANSYS CFX [1–8]. Это связано с большой стоимостью, сложностью постановки и проведения экспериментов на моделях в аэродинамических трубах для получения нагрузок, действующих на различные конструкции при наличии потока воздуха. Однако методика, позволяющая эффективно использовать программные средства и вычислительные технологии для исследования аэроупругих процессов в сооружениях, пока не разработана.

В данной статье рассматривается задача о возможности исследования аэроупругих колебаний математическими средствами. Такая проблема рассматривалась ранее в работах [3–5, 9, 10]. Сравнения экспериментальных данных с результатами расчета по ПК ANSYS CFX носили косвенный характер.

В статье проведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчета в ANSYS CFX, выполнено прямое сравнение физического и математического экспериментов. Новый подход позволил получить удовлетворительные результаты, что подтверждается экспериментом.

Физический эксперимент

В аэродинамической трубе Крыловского государственного научного центра был проведен эксперимент для определения аэродинамических параметров, визуализации течения и исследования аэроупругих колебаний элементов навесов здания вокзала «Олимпийский парк» (рис. 1) [11]. Однако эти исследования имеют более общий характер, так как подобного рода аэроупругие процессы возможны в самых различных элементах современных зданий и сооружений, а также фасадов зданий. Навесы и козырьки являются архитектурными элементами фасада здания, имеющими эстетическую функцию, кроме того, они несут в себе практический смысл, защищая здание от атмосферных осадков и других погодных воздействий.

Экспериментальные исследования проводились в дозвуковой аэродинамической трубе замкнутого типа с открытой рабочей частью, имеющей эллиптическое сечение размерами 4 × 2,3 м. Длина рабочей части трубы составляет 4 м. Максимальная скорость потока достигает 70 м/с.



Рисунок 1. Макет здания вокзала в аэродинамической трубе

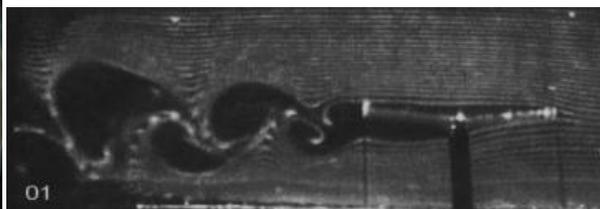


Рисунок 2. Течение вокруг навеса

В ходе экспериментов в рабочей части аэродинамической трубы располагаются модели, а также горизонтальный экран, имитирующий земную поверхность [12–14]. Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены геометрически подобные серии моделей навесов, соответствующие различным сечениям системы навесов над платформами вокзала в масштабе 1:100, и модели навесов для проведения испытаний в гидродинамической трубе. Исследования по определению аэродинамических параметров зданий и сооружений обладают свойством автомодельности (число Re не моделируется, т.к. модели являются плохообтекаемыми телами, у которых точки отрыва потока соответствуют натуре) [11].

В результате эксперимента были найдены коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы. Также было установлено, что с поверхности навесов срываются вихри в периодическом порядке. Периодический срыв вихрей может вызвать появление переменных составляющих вертикальной силы и момента, которые будут действовать на поверхности навеса. Если частота срыва вихрей будет совпадать с частотами собственных колебаний навесов, то возникнет резонанс, который представляет опасность для конструкции [15–18]. На рисунке 2 представлен фрагмент схода вихрей.

Численный эксперимент

Наряду с экспериментальными исследованиями был проведен численный эксперимент в программе вычислительной гидродинамики ANSYS CFX.

Для определения аэродинамических параметров сооружения также применяются программы вычислительной гидродинамики CFD, основанные на численном решении систем уравнений движения жидкости/газа Навье – Стокса и предназначенные для решения широкого круга задач прикладной аэрогидродинамики и теплообмена. Применение пакетов такого уровня в практике строительных расчетов еще только начинается, поскольку они очень сложны и для их эффективного использования требуется длительный опыт и высокая квалификация пользователей.

В настоящее время применяются методы, основанные на использовании моделей турбулентности. Эти модели специально разработаны, чтобы учесть эффекты турбулентности без применения точной сетки и прямого численного решения.

Большинство методов основано на применении статистических моделей турбулентности для решения уравнений Рейнольдса – Навье – Стокса RANS (Reynolds Averaged Navier – Stokes equations). Исключения составляют LES (Large Eddy Simulation) и DES (Detached Eddy Simulation) методы.

Метод LES (Large Eddy Simulation) разработан для расчета крупномасштабных флуктуаций. Он основан на решении нестационарных уравнений Навье – Стокса с использованием модели турбулентности для описания мелкомасштабных движений подсеточного масштаба. В ANSYS CFX для описания мелкомасштабных движений применяется модель Смагоринского [19] с двумя различными пристенными функциями демпфирования.

Метод DES (Detached Eddy Simulation) является комбинацией LES и RANS. В зоне внешнего «гладкого» течения используется RANS, а в зоне отрыва потока с крупными вихрями – LES. По сравнению с методом LES, DES сохраняет порядок величины компьютерной мощности для течений с высоким числом Рейнольдса из-за умеренных затрат модели RANS в пограничном слое.

Для моделирования течения в численном эксперименте была использована замыкающая уравнения RANS модель турбулентности Ментера SST. Для расчета в CFX была построена конечно-элементная модель среды [19, 20]. Среда расположена в канале прямоугольного сечения с гладкими стенками. В центре среды расположен контур обтекаемого навеса. На поверхности навеса был сгенерирован пограничный слой, толщину которого определяют по формуле [21]:

$$\delta = 0.035 \cdot L \cdot \text{Re}_L^{-\frac{1}{7}}, \quad (1)$$

где L – поперечный размер, м;
 Re – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса определено по формуле [17]:

$$\text{Re} = \rho \cdot \frac{U \cdot L}{\mu} = \frac{U \cdot L}{\nu}, \quad (2)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;
 U – скорость потока, м/с;
 L – характерный размер, м;
 μ – вязкость воздуха, кг/(м·с);
 ν – его кинематическая вязкость;

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (3)$$

Пограничный слой был разрезан на 12 подслоев, количество конечных элементов составило 35000 (рис. 3).

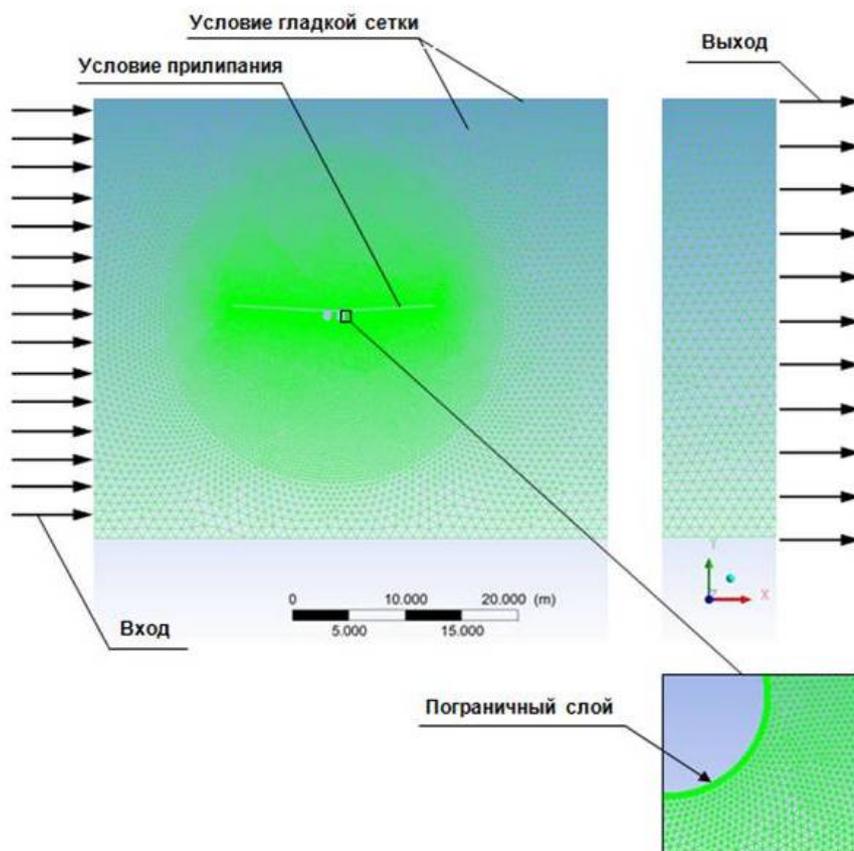


Рисунок 3. Конечно-элементная модель

Мелешко В.А., Хертек У.Х., Роговой Ю.А. Определение аэродинамических параметров навеса вокзала «Олимпийский парк». Физический и численный эксперименты

Для модели турбулентности Ментера (SST) с пристеночной функцией Automatic Near-Wall Treatment необходимо выполнить условие $Y^+ < 200$, где Y^+ – безразмерное расстояние от стенки до первого узла конечно-объемной сетки [21–23]. Применение пристенных функций позволяет получать решение на относительно грубых сетках. Этот параметр позволяет оценить сеточное разрешение в пограничном слое [21]. Безразмерный параметр Y^+ составил 0.49.

Задача была решена в нестационарном режиме (Transient) на временном интервале 20 с.

В модели были приняты следующие граничные условия:

- на входе в расчетную область задана скорость потока U , интенсивность турбулентных пульсаций I , масштаб турбулентности l_t ;
- 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 – условие прилипания (нулевая скорость).

Начальные условия для численного расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Начальные условия

Скорость ветрового потока U , м/с	30
Интенсивность турбулентности I , %	1
Масштаб турбулентности l_t , м	$0,1 D$

В результате расчета были получены аэродинамические коэффициенты C_x и C_y (рис. 4).

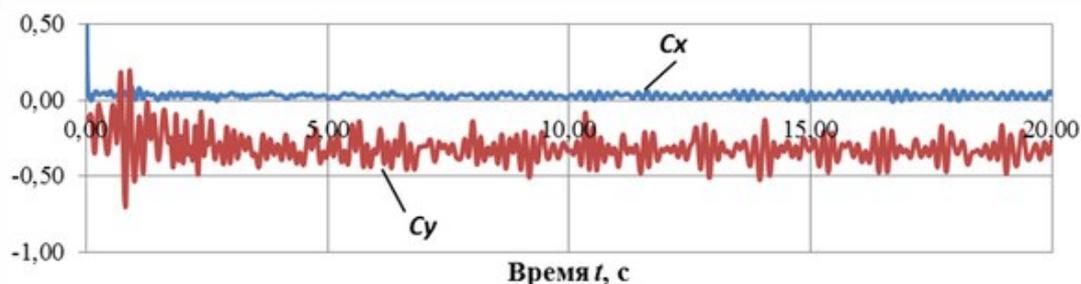


Рисунок 4. Графики изменения аэродинамических коэффициентов

По графику видно частое периодическое изменение коэффициента подъемной силы, это связано с неустойчивым решением дифференциальных уравнений.

Для получения устойчивого решения требуется выполнить условие Куранта – Фридрихса – Леви (КФЛ) [24, 25]:

$$C = u \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1, \quad (4)$$

где u – скорость, м/с;

Δt – временной шаг, с;

Δx – пространственный шаг, м.

Для выполнения этого условия в ANSYS CFX предусмотрена возможность установки адаптивного шага в соответствии с критерием КФЛ, с указанием минимального и максимального шага по времени и коэффициентов релаксации [26].

Чтобы точнее определить аэродинамические параметры, был проведен дополнительный расчет в CFX с использованием метода отсоединенных вихрей DES [27, 28]. Результаты расчета показаны на рисунках 5, 6 для DES.

По графику среднее значение $C_y = 0,44$, а $C_x = 0,19$, что согласуется с физическим экспериментом. Сравнение физического эксперимента и численного расчета в CFX приведено в таблице 2. Как видно из таблицы, соответствие расчетных и экспериментальных значений удовлетворительное.

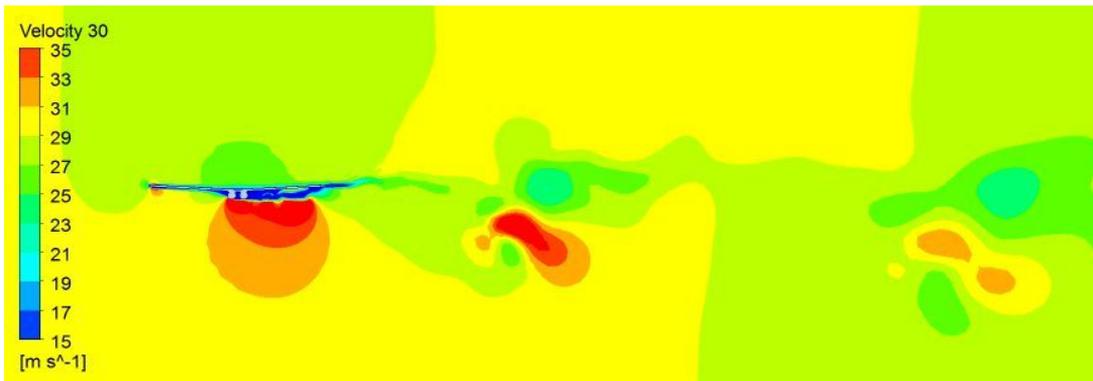


Рисунок 5. Течение вокруг модели навеса

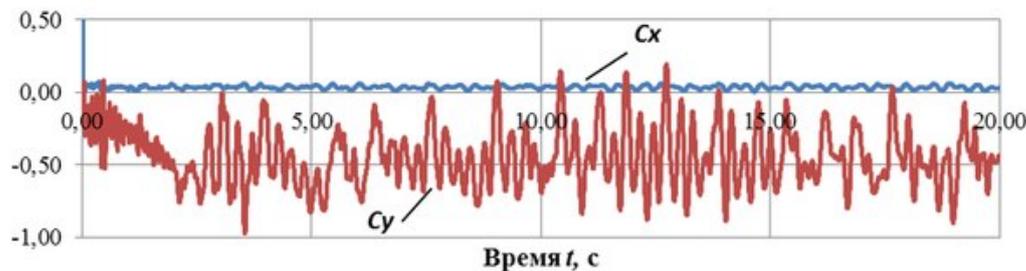


Рисунок 6. Графики изменения аэродинамических коэффициентов

Таблица 2. Сравнение физического эксперимента и численного расчета

Параметр	Физический эксперимент	CFX	Δ , %
C_x	0,125	0,19	34
C_y	0,436	0,44	1

Выводы

1. Предлагаемая методика численного анализа может быть использована для определения аэродинамических параметров не только навесов, но и аналогичных конструкций.
2. Методика позволяет учитывать при проектировании возможность появления критических скоростей ветра и резонансных явлений в навесах.
3. В результате сравнения экспериментальных значений аэродинамических параметров моделей навеса вокзала с численным анализом было получено удовлетворительное совпадение.
4. Предлагаемая методика численного анализа аэроупругих процессов позволяет уменьшить временные ресурсы на проектный анализ, дает требуемую точность расчета, а также сокращает стоимость проектных работ за счет использования современных вычислительных средств вместо дорогостоящих экспериментов в аэродинамических трубах.

Литература

1. Гувернюк С.В., Гагарин В.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий. Часть 1 // АВОК. 2006. №8. С. 18–24.
2. Дубинский С.И. Расчеты высотных сооружений при ветровом воздействии // САПР и графика. 2005. №10. С. 32–34.
3. Рутман Ю.Л., Мелешко В.А. Применение программы ANSYS CFX для определения коэффициентов лобового сопротивления высотных сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2011. №1. С. 45–46.
4. Рутман Ю.Л., Мелешко В.А. Причины колебаний моста в Волгограде // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. №3. С. 55–58.
5. Рутман Ю.Л., Мелешко В.А. Оценка сооружений на возникновение галопирования // Инженерно-строительный журнал. 2011. №6(24). С. 6–12.

Мелешко В.А., Хертек У.Х., Роговой Ю.А. Определение аэродинамических параметров навеса вокзала «Олимпийский парк». Физический и численный эксперименты

6. Ching-Wen C., Jing-Jong J. Case study of wind-resistant design and analysis of high mast structures based on different wind codes // Journal of Marine Science and Technology. 2008. Vol. 16. No.4. Pp. 275–287.
7. Letchford C.W. Wind Loads on Rectangular Signboards and Hoardings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2001. Vol. 89. Pp. 135–151.
8. Yin Zhou, Kijewski T., Kareem A. Along-Wind Load Effects on Tall Buildings: Comparative Study of Major International Codes and Standards // Journal of structural engineering. 2002. Vol. 128. Issue 6. Pp. 788–796.
9. Hansen S. Vortex-induced vibrations of line-like structures // Structural Engineers World Congress 2007, November 2–7. 2007. Vol. 15. No.1. Pp. 15–23.
10. Giosan I., Eng P. Vortex Shedding Induced Load on Loads on Free Standing Structures [Электронный ресурс]. URL: http://www.wceng-fea.com/vortex_shedding.pdf (дата обращения 20.11.2013).
11. Отчет о научно-исследовательской работе. Исследование аэродинамических характеристик макета здания вокзала «Олимпийский парк» / ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова». СПб., 2011. С. 75.
12. Пэнкхёрст Р., Холдер Д. Техника эксперимента в аэродинамических трубах / Пер. с англ. Под ред. С.Г. Попова. М.: Изд. иностр. лит., 1955. 668 с.
13. Pereira J.D. Wind Tunnels: Aerodynamics, Models and Experiments. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. 227 p.
14. Cunff C. Le, Biolley F., Fontaine E., Etienne S., Facchinetti M. L. Vortex – Induced Vibrations of Risers: Theoretical, Numerical and Experimental Investigation // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. 2002. Vol. 57. No.1. Pp. 59–69.
15. Johari H., Desabrais K. Vortex shedding in the near wake of a parachute canopy // Journal of Fluid Mechanics. 2005. Vol. 536. Pp. 185–207.
16. Ланда П. С. Срывной флаттер и эффект затягивания // Вестник научно-технического развития. 2009. №6(22). С. 10–19.
17. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействия ветра на здания и сооружения / Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1984. 360 с.
18. ЗАО «Конби». Определение среднего ветрового давления [Электронный ресурс]. URL: http://conbi.ru/index_1.htm (дата обращения 20.11.2013).
19. User's Guide for ANSYS CFX 12. 2013.
20. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: БГТУ, 2001. 108 с.
21. User's Guide for ANSYS CFX 12. 2008.
22. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2009. 257 p.
23. МКЭ. Сетки. Общие сведения [Электронный ресурс]. URL: <http://www.procae.ru/articles/24/72.html> (дата обращения 01.10.2013).
24. Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD. Monreal: DCW Industries, Inc., 2006. 522 p.
25. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей / Пер. с англ.: В 2-х т. Т. 1. Под ред. В.П. Шидловского. М.: Мир, 1991. 504 с.
26. Коньшин В., Щеляев А. Новые возможности проектирования и инженерного анализа в системе ANSYS CFX версии 10.0 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=14599> (дата обращения 06.10.2013).
27. Методическое руководство по ANSYS CFX 12.1.2010.
28. Menter F.R. Advances in Turbulence Modeling of Unsteady Flows [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.dansis.dk/Filarkiv/pdf-filer/2009/3/03%20Florien_Menter_DANSIS2009.pdf (дата обращения 15.11.2013).

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

*Урана Хойтпак-ооловна Хертек, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)379-24-32; эл. почта: urana_hertek@mail.ru*

*Юрий Алексеевич Роговой, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(931)310-39-03; эл. почта: spbrog@mail.ru*

© Мелешко В.А., Хертек У.Х., Роговой Ю.А., 2013

Мелешко В.А., Хертек У.Х., Роговой Ю.А. Определение аэродинамических параметров навеса вокзала «Олимпийский парк». Физический и численный эксперименты

doi: 10.5862/MCE.44.1

Determination of aerodynamic parameters of "Olympic Park" railway station canopy. Physical and numerical experiments

V.A. Meleshko,

*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia
+7(921)7480716; e-mail: vl-meleshko@yandex.ru*

U.Kh. Khertek,

*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia
+7(921)3792432; e-mail: urana_hertek@mail.ru*

Yu.A. Rogovoy,

*Krylov State Research Centre, Saint-Petersburg, Russia
+7(931)3103903; e-mail: spbrog@mail.ru*

Key words

station canopy; wind tunnel; vortex shedding; aerodynamic parameters; turbulence model

Abstract

This article describes the results of experimental and numerical simulation of flow layout sheds station building "Olympic Park". The experimental results of the station model are presented.

The station model is analyzed using ANSYS CFX to model the air flow and to determine the aerodynamic parameters. Navier – Stokes equations were solved using the SST turbulence model. Furthermore, aerodynamic analysis was performed using the detached eddy DES method.

A comparison of the experimental values of the aerodynamic parameters of the models with results numerical simulation obtained in ANSYS CFX was in satisfactory agreement.

References

1. Guvernuyuk S.V., Gagarin V.G. *AVOK*. 2006. No.8. Pp. 18–24. (rus)
2. Dubinskiy S.I. *SAPR i grafika*. 2005. No. 10. Pp. 32–34. (rus)
3. Rutman Yu.L., Meleshko V.A. *Industry and Civil Engineering*. 2011. No. 1. Pp. 45–46. (rus)
4. Rutman Yu.L., Meleshko V. A. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2011. No 3. Pp. 55–58. (rus)
5. Rutman Yu L., Meleshko V. A. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 6(24). Pp. 6–12. (rus)
6. Ching-Wen C., Jing-Jong J. Case study of wind-resistant design and analysis of high mast structures based on different wind codes. *Journal of Marine Science and Technology*. 2008. Vol. 16. No. 4. Pp. 275–287.
7. Letchford C.W. Wind Loads on Rectangular Signboards and Hoardings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2001. Vol. 89. Pp. 135–151.
8. Yin Zhou, Kijewski T., Kareem A. Along-Wind Load Effects on Tall Buildings: Comparative Study of Major International Codes and Standards. *Journal of structural engineering*. 2002. Vol. 128. Issue 6. Pp. 788–796.
9. Hansen S. Vortex-induced vibrations of line-like structures. *Structural Engineers World Congress 2007*, November 2–7. 2007. Vol. 15. No.1. Pp. 15–23.
10. Giosan I., Eng P. *Vortex Shedding Induced Load on Loads on Free Standing Structures* [Online resource]. System Requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.wseng-fea.com/vortex_shedding.pdf (accessed: November 20, 2013).
11. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote. Issledovaniye aerodinamicheskikh kharakteristik maketa zdaniya vokzala «Olimpiyskiy park»* [Report on the research work. Investigation of aerodynamic characteristics of layout of building station "Olympic parc"]. Saint-Petersburg: Krylov State Research Centre, 2011. P. 75 (rus)
12. Penkherst R., Kholder D. *Tekhnika eksperimenta v aerodinamicheskikh trubakh* [Experimental Techniques in wind tunnels]. Moscow: Izd. inostr. lit., 1955. 668 p. (rus)

Meleshko V.A., Khertek U.Kh., Rogovoy Yu.A. Determination of aerodynamic parameters of "Olympic Park" railway station canopy. Physical and numerical experiments

13. Pereira J.D. *Wind Tunnels: Aerodynamics, Models and Experiments*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. 227 p.
14. Cunff C. Le, Biolley F., Fontaine E., Etienne S., Facchinetti M. L. Vortex – Induced Vibrations of Risers: Theoretical, Numerical and Experimental Investigation. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*. 2002. Vol. 57. No. 1. Pp. 59–69.
15. Johari H., Desabrais K. Vortex shedding in the near wake of a parachute canopy. *Journal of Fluid Mechanics*. 2005. Vol. 536. Pp. 185–207.
16. Landa P.S. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya*. 2009. No. 6 (22). Pp. 10–19. (rus)
17. Simiu E., Skanlan R. *Vozdeystviya vetra na zdaniya i sooruzheniya* [Wind actions on buildings and structures]. Translated from English. Moscow: Stroyizdat, 1984. 360 p. (rus)
18. ZAO «Konbi». *Opredelenie srednego vetrovogo davleniya* [Determination of the mean wind pressure] [Online resource]. URL: http://conbi.ru/index_1.htm (accessed: November 20, 2013).
19. *User's Guide for ANSYS CFX 12*. 2013.
20. Belov I.A., Isayev S.A. *Modelirovaniye turbulentnykh techeniy* [Modeling of turbulent flows]. Saint-Petersburg: BGTU, 2001. 108 p. (rus)
21. *User's Guide for ANSYS CFX 12*. 2008.
22. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Canonsburg: ANSYS, Ing., 2009. 257 p.
23. *MKE. Setki. Obshchiye svedeniya* [FEM. Mesh. General Overview] [Online resource]. URL: <http://www.procae.ru/articles/24/72.html> (accessed: October 1, 2013). (rus)
24. Wilcox D. C. *Turbulence modeling for CFD*. Monreal: DCW Industries, Inc., 2006. 522 p.
25. Fletcher K. *Vychislitelnyye metody v dinamike zhidkostey* [Numerical Methods for Fluid Dynamics]. Translated from English: In 2 vol. Vol. 1. Moscow: Mir, 1991. 504 p. (rus)
26. Konshin V., Shchelyayev A. *Novyye vozmozhnosti proyektirovaniya i inzhenernogo analiza v sisteme ANSYS CFX versii 10.0* [New features of design and engineering analysis in the ANSYS CFX version 10.0] [Online resource]. URL: <http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=14599> (accessed: October 6, 2013). (rus)
27. *Metodicheskoye rukovodstvo po ANSYS CFX 12.1.2010* [Methodical guide on ANSYS CFX 12.1.2010].
28. Menter F.R. *Advances in Turbulence Modeling of Unsteady Flows* [Online resource]. System Requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.dansis.dk/Filarciv/pdf-filer/2009/3/03_Florien_Menter_DANSIS2009.pdf (accessed: November 15, 2013).

Full text of this article in Russian: pp. 4–9