Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №3, Том 6 / 2019, No 3, Vol 6 <https://t-s.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/06SATS319.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/06SATS319>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Козичев А.В., Парышев С.Э., Стрелков К.С., Шустикова А.А., Теперин Л.Л. Исследование аэроупругой устойчивости двух пролетных строений в условиях взаимной интерференции // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, <https://t-s.today/PDF/06SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/06SATS319

For citation:

Kozichev A.V., Paryshev S.E., Strelkov K.S., Shustikova A.A., Teperin L.L. (2019). Investigation of aeroelastic stability of two bridges under interference conditions. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/06SATS319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/06SATS319

УДК 624.21/8

ГРНТИ 67.11.35

Козичев Андрей Валерьевич

ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Россия
Инженер 1-й категории
E-mail: andreikozichev@mail.ru

Парышев Сергей Эмильевич

ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Россия
Начальник отделения норм прочности, нагрузки и аэроупругости
Кандидат технических наук
E-mail: sergei.paryshev@tsagi.ru

Стрелков Константин Сергеевич

ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Россия
Заместитель начальника отделения
E-mail: ksstrel36@mail.ru

Шустикова Анастасия Андреевна

ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Россия
Инженер
E-mail: shustic09@gmail.com

Теперин Леонид Леонидович

ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Россия
Начальник отдела
Кандидат технических наук
E-mail: teperin@mail.ru

Исследование аэроупругой устойчивости двух пролетных строений в условиях взаимной интерференции

Аннотация. В последнее время возникла проблема взаимного влияния двух параллельных автодорожных мостов. Для повышения пропускной способности автомагистралей параллельно с действующими автодорожными мостами сооружаются новые мосты, располагаемые в непосредственной близости от действующих. Характеристики

устойчивости таких сдвоенных мостов пока изучены недостаточно. Данные испытаний показали, что поведение сдвоенных мостов в потоке ветра отличается от одиночных мостов и обеспечить снижение амплитуды колебаний таких мостов до приемлемого уровня зачастую является более трудной задачей, чем для одиночных мостов. Поэтому для оценки безопасности эксплуатации двух размещенных параллельно мостов необходимо проводить расчетные и экспериментальные исследования, а также изучать поведение таких мостов в процессе эксплуатации с помощью систем динамического мониторинга. Учитывая их широкое применение, в данной работе исследовалась интерференция двух близкорасположенных мостов на примере мостов через р. Белая в городе Уфа Республики Башкортостан на этапе эксплуатации.

Цель работы – исследование характера и интенсивности аэроупругих колебаний мостов в условиях интерференции, а также разработка рекомендаций по оптимальному расположению параллельных мостов для снижения уровня амплитуд «ветровых» колебаний.

Результаты исследований позволили оценить влияние ветрового потока на пролетное строение в следе за другим мостом и дать рекомендации по снижению уровня амплитуд колебаний. Данное исследование выявляет наиболее тяжелый случай взаимодействия, так как синхронизация срывающихся вихрей по всей длине пролетов представляет собой случайный процесс. В отсутствии синхронности нагрузки будут иметь меньшую величину.

Ключевые слова: аэроупругая устойчивость; близкорасположенные мосты; пролетное строение; вихревое возбуждение; вертикальные колебания; численное моделирование

Введение

Характеристики устойчивости двух близкорасположенных мостов пока изучены недостаточно. В аэродинамической трубе Т-103 в ЦАГИ проводились испытания моделей сдвоенных мостов, таких, как в г. Уфе, на р. Шексне и в г. Аксай. Данные испытания показали, что поведение сдвоенных мостов в потоке ветра отличается от одиночных мостов и обеспечить снижение амплитуды колебаний таких мостов до приемлемого уровня зачастую является более трудной задачей, чем для одиночных мостов.

Объектом расчетных исследований являлись два близкорасположенных одинаковых моста через р. Белая в городе Уфе Республики Башкортостан на этапе эксплуатации. Рассмотрено такое явление аэроупругой неустойчивости как вихревое возбуждение пролетного строения в следе.

Описание явления вихревого возбуждения

При аэродинамическом взаимодействии – интерференции – двух мостовых сооружений проявляются колебания типа вихревого возбуждения. Возникающий аэродинамический след характеризуется крупномасштабными пульсациями давления, которые обуславливают переменное аэродинамическое воздействие как на конструкцию, находящуюся в следе, так и на конструкцию, создающую этот след. Основным источником энергии при колебаниях бафтинга являются вихревые образования, периодически проходящие мимо поверхностей конструкции и генерирующие нестационарные нагрузки возмущенным набегающим потоком [1]. Спектр мощности давлений в спутном следе за плохообтекаемыми телами при определенных частотах может иметь ярко выраженные максимумы, в которых сосредоточена кинетическая энергия турбулентного движения, т. е. за типичными несущими поверхностями также формируется вихревые дорожки Кармана с определенным числом Струхала (рис. 1).

Рисунок 1. Образование вихрей при обтекании пролёта моста потоком воздуха при испытании модели в аэродинамической трубе (составлено автором)

Вихревое возбуждение проявляется в случае совпадения или близости собственных частот колебаний упругой конструкции с частотами схода вихрей с плохообтекаемого тела. Частоты синхронизируются и образуется вихревая дорожка Кармана с максимальной интенсивностью при определенной скорости набегающего потока [2; 3]:

$$Sh = \frac{f * H}{V} \Rightarrow V_{кр} = \frac{f * H}{Sh} \quad (1)$$

где $V_{кр}$ – критическая скорость вихревого возбуждения;

f – собственная частота первого или второго тона колебаний пролётного строения моста в вертикальной плоскости;

H – высота поперечного сечения пролётного строения;

Sh – число Струхала.

Число Струхала зависит от соотношения B/H , где B – габаритная ширина пролётного строения. Определить его можно по графику (рис. 2), полученному по результатам многочисленных испытаний различных моделей мостов в аэродинамических трубах ЦАГИ [4]. Виден некоторый разброс значений чисел Струхала и отличие полученной в ЦАГИ зависимости от приведенной в Евронормах (Еврокод 1 «Воздействия на конструкции. Часть 1–4. Общие воздействия. Ветровые воздействия. Раздел 8»). Это объяснимо тем, что сечения профилей исследованных мостов существенно отличаются друг от друга и, тем более, отличаются от прямоугольного профиля мостов, для которых приведены зависимости в Евронормах.

Обычно при вихревом возбуждении колебания мостов происходят на низшей, первой частоте собственных вертикальных колебаний. Но в случае низкого значения частот вертикальных колебаний (второй тон вертикальных колебаний ниже 1 Гц) оценку критической скорости вихревого возбуждения следует провести с использованием формулы (1) и для второго тона, так как при более высокой скорости ветра может возникнуть второй пик колебаний.

Рисунок 2. График зависимости значений числа Струхала Sh от соотношения габаритной ширины поперечного сечения пролётного строения B с его высотой H для этапа «эксплуатация» (по результатам испытаний моделей в аэродинамических трубах ЦАГИ) (составлено автором)

Анализ представленного на рисунке 2 графика показывает, что мосты в диапазоне соотношения $B/H = 3 - 4,5$ имеют при всех прочих равных параметрах более низкие значения критической скорости вихревого возбуждения. Значения соотношения $B/H < 2$ также неблагоприятны. Особенно неудачными следует считать решения с соотношением $B/H \approx 3,5$, так как в этом случае наблюдаются максимальные значения числа Струхала $Sh = 0,15$ и, следовательно, минимальные скорости ветра, при которых возможно возникновение вихревого возбуждения.

Опыт проведенных испытаний моделей мостов в аэродинамических трубах показывает, что использование предлагаемой методики позволяет на предварительном этапе проектирования определить скорость возникновения колебаний моста [5].

Существует, полученный экспериментально, график зависимости числа Струхала Sh от соотношения относительного продольного расстояния S между призмами прямоугольного сечения с их высотой H (рис. 3, 4) [6].

Так как мост по форме поперечного сечения похож на призму – плохобтекаемые тела – можно считать, что этот график приблизительно оценивает число Струхала Sh для мостов на расстоянии S . Данная кривая для мостов будет иметь похожую зависимость, но более острый пик при начальных значениях и более монотонное возрастание числа Струхала Sh для значения отношения S/H больше 5. Этот график аналогичен графику зависимости значений числа Струхала Sh от соотношения B/H (рис. 2).

Рисунок 3. График зависимости числа Sh от относительного продольного расстояния S/H [6]

Рисунок 4. Схема расположения и характерные размеры исследуемых объектов с указанием направления потока [6]

Из графика на рисунке 3 можно заметить, что при значении соотношения относительного продольного расстояния S между призмами прямоугольного сечения с их высотой H в диапазоне $1.5 < S/H < 5$ имеется резкое изменение значения числа Струхали. При этом происходит явление захвата частоты срыва вихрей с наветренной призмы частотой аэроупругих колебаний призмы в следе (бистабильность течения) [6]. Так как и у мостовых сооружений происходит синхронизация частоты срыва вихрей с одной из собственных частот колебаний упругой конструкции можно считать, что в этом диапазоне значений S/H аналогично будет проявляться явление захвата частотой.

Расчетные исследования двух близкорасположенных мостов

Проблема аэродинамической устойчивости двух близко расположенных автодорожных мостов рассмотрена на примере мостов через р. Белая в городе Уфе Республики Башкортостан на этапе эксплуатации.

Задача решалась на основе численного моделирования обтекания отсечных моделей автодорожных мостов. Исследована аэродинамическая устойчивость отсечных моделей автодорожных мостов в диапазоне скоростей ветра до 40 м/с, набегающего на пролетные строения под углами атаки -5° , 0° и 5° .

Математическая модель построена на основе чертежей поперечных сечений пролетных строений с их взаимным расположением (рис. 5, 6). В математические модели включаются только те элементы мостов, которые формируют аэродинамические силы под действием ветра. Отсечные модели мостов были помещены в расчетную область с конечно-элементной сеткой, состоящей из 500000 тетраэдрических элементов.

Рисунок 5. Поперечные сечения автодорожных мостов (составлено автором)

Рисунок 6. Математическая модель поперечных сечений автодорожных мостов (составлено автором)

Определение аэродинамической устойчивости автодорожных мостов состояло из следующих этапов:

- Определение зависимости аэродинамической вертикальной силы от времени, действующей на неподвижные отсечные модели автодорожных мостов методом решения уравнений Навье-Стокса, в заданном диапазоне углов атаки ветра (-5° , 0° и 5°), при базовом значении скорости ветра 20 м/с.
- Определение скорости вихревого возбуждения и амплитуды вертикальных колебаний отсечных моделей на основе решения одномерного уравнения колебаний и подобия по числу Струхала. При этом была рассмотрена только вертикально-изгибная форма колебаний автомобильного мостового перехода на двух первых частотах.

Вертикальная пульсирующая аэродинамическая сила рассчитывалась при базовой скорости ветра 20 м/с и углах атаки ветра -5° , 0° и 5° . На рисунке 7 показаны линии тока, окрашенные в цвета местной скорости.

На рисунке 8 показана зависимость вертикальной аэродинамической силы, действующей на наветренный и подветренный мост с 50 по 150 секунду счета. Из графика на рисунке 8 видно, что пульсации аэродинамической силы близки к гармоническому закону и происходят с одной частотой у наветренного и подветренного моста, но с различной амплитудой. Аналогичные результаты были получены на других углах атаки. Узкая частотная полоса пульсаций аэродинамической силы предполагает острую «настройку» вихревого возбуждения по скорости ветра. Чтобы учесть непостоянство интенсивности ветра, в расчетах было использовано усреднение амплитуды колебаний мостов в диапазоне 1 м/с, что соответствует изменению скорости ветра на 5 %.

Рисунок 7. Линии тока, рассчитанные при скорости ветра 20 м/с и угле атаки 5° (составлено автором)

Рисунок 8. Аэродинамическая сила, действующая на наветренный и подветренный мост на угле атаки 5° и скорости ветра 20 м/с (составлено автором)

Используя закон подобия по числу Струхала, из расчета при базовой скорости ветра получена зависимость аэродинамической силы от времени для скорости ветра больше и меньше базовой.

Для определения амплитуды у вертикальных колебаний мостов использовалось численное решение методом Ньютона одномерного уравнения колебаний для каждого моста независимо (2) [7; 8]:

$$\ddot{y} + \delta \frac{p_y}{\pi} \dot{y} + p_y^2 y = Y(t)/m_{ey} \quad (2)$$

где y – смещение отсечной модели по вертикали, м;

p_y – круговая частота изгибных колебаний, Гц;

m_{ey} – эквивалентная погонная масса, кг/м;

$Y(t)$ – аэродинамическая погонная сила, действующая на отсечную модель моста, Н/м.

Результаты, полученные для нулевого угла атаки, показали, что ярко выраженного вихревого возбуждения мостов на этом угле атаки нет. При ненулевом угле атаки 5° расчеты выявили, что наиболее сильное вихревое возбуждение наблюдается на подветренном автодорожном мосте, как по первому, так и по второму тону. На рисунке 9 представлена зависимость от скорости ветра амплитуды колебаний наветренного (синяя линия) и подветренного (красная линия) мостов на угле атаки 5° . Пунктирные линии на графиках соответствует расчету без усреднения, а сплошные с усреднением результата в диапазоне изменения амплитуды скорости ветра равным 1 м/с.

Наибольшая амплитуда (700 мм) наблюдается у подветренного моста по второму тону при скорости ветра ~ 27 м/с как это видно из таблицы 1. Аналогично, для угла атаки -5° выявлено явление вихревого возбуждения подветренного моста.

Рисунок 9. Зависимость амплитуды изгибных колебаний от скорости по первому (слева) и второму тону (справа), угол атаки 5° (составлено автором)

Таблица 1

Максимальные амплитуды колебаний и пиковые ускорения на угле атаки 5°

Погонная масса 9.67 т/м; конструктивный декремент 0.02				
Форма колебаний	Мост	Частота [Гц]	$V_{кр}$ [м/с]	Амплитуда [мм]
1	Наветренный	0.484	22.2	158
	Подветренный		21.8	622
2	Наветренный	0.594	26.7	176
	Подветренный		26.7	700

Составлено автором

Проведенное численное моделирование аэроупругой устойчивости сдвоенного мостового перехода показало, что подветренный мост имеет большую амплитуду вертикальных колебаний, чем наветренный во всех рассмотренных вариантах собственных частот колебаний и направлений ветра.

Для оценки числа Струхала использовались следующие значения: расстояние между мостами составляет $S = 0.5$ м, высота каждого пролетного строения $H = 3.36$ м, ширина $B = 13.7$ м. Значит, характеризующие число Струхала соотношения равны $S/H = 0.15$ и $B/H = 4.1$. Исходя из графиков на рисунках 2 и 3, можно сделать вывод, что число Струхала для двух мостов составляет $Sh \approx 0.1$. Данное значение является неблагоприятным как для одиночного моста, так и для двух близкорасположенных мостов. Расчетные исследования пролетных строений через р. Белая в городе Уфе на этапе эксплуатации являются подтверждением анализа возможности возникновения вихревого возбуждения с помощью графиков зависимости значения числа Струхала Sh от B/H и от S/H .

Численное моделирование вихревой дорожки

Как уже отмечалось выше, при срыве потока с поверхности моста за ним формируется вихревая дорожка. При определённых частотах срыва, вихри имеют ярко выраженные максимумы кинетической энергии турбулентного движения. Рассмотрено обтекание модели двух мостовых конструкций ветровым потоком с критической скоростью вихревого возбуждения при различных величинах зазора S между мостами.

Численное моделирование выполнено в ПК ANSYS Fluent с использованием модели турбулентности – SST [9]. Рассмотрены параметры течения: линии тока, распределение модуля скорости при срыве потока с наветренного моста и турбулентная вязкость, обусловленная крупномасштабными пульсациями и вихревым переносом количества движения [10]. В результате получены картины течения вблизи моделей и формирование вихревой дорожки, распределение модуля скорости, статического давления и кинетической энергии турбулентности. По ним можно судить об интенсивности аэроупругих колебаний типа вихревого возбуждения вследствие интерференции двух мостовых конструкций.

На рисунках 10–17 (составлены автором) представлены картины течения при различных расстояниях S между мостами (таблица 2): сверху и снизу профиля моста имеются отрывные зоны с возвратным течением, за ним возникают интенсивные вихреобразования. В каждый момент времени вихревой поток меняет положение и изменяется распределение аэродинамической нагрузки, что создаёт нестационарное течение в следе.

Таблица 2

Расстояния S и соответствующие значения отношения S/H

S , м	0.5	1.5	5	9	12	16	19	21
S/H	0.13	0.4	1.31	2.36	3.15	4.21	5	5.5

Составлено автором

Рисунок 10. Линии тока вблизи моделей и турбулентная вязкость при $S = 0.5$ м

Рисунок 11. Линии тока вблизи моделей и турбулентная вязкость при $S = 1.5$ м

Рисунок 12. Линии тока вблизи моделей и турбулентная вязкость при $S = 5$ м

Рисунок 13. Линии тока вблизи моделей и турбулентная вязкость при $S = 9$ м

Рисунок 14. Линии тока вблизи моделей и турбулентная вязкость при $S = 12$ м

Рисунок 15. Линии тока вблизи моделей и турбулентная вязкость при $S = 16$ м

Рисунок 16. Линии тока вблизи моделей и турбулентная вязкость при $S = 19$ м

Рисунок 17. Линии тока вблизи моделей и турбулентная вязкость при $S = 21$ м

Из результатов численного моделирования течения около двух мостов можно увидеть, что при расстояниях $S = 5, 9, 12$ и 16 м вихрь, сходящий с наветренного моста, приходит на подветренный с большим значение кинетической энергии и под ненулевым углом атаки. Это является причиной появления периодической поперечной аэродинамической нагрузки и, как следствие, возбуждение колебаний конструкции.

Заключение

В работе представлено исследование взаимодействия двух близкорасположенных мостов на примере моста через р. Белая в городе Уфе Республики Башкортостан на этапе эксплуатации. В результате численного моделирования аэроупругой устойчивости получено, что подветренный мост имеет большую амплитуду вертикальных колебаний, вследствие нахождения в следе за наветренным мостом.

Теоретический анализ также показал большую вероятность возникновения явления вихревого возбуждения двух близкорасположенных мостовых переходов. Для снижения уровня амплитуд колебаний проводятся дополнительные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарифуллин, М.Ф. Бафтинг / М.Ф. Гарифуллин – М.: Физматлит, 2010. – 216 с.
2. Казакевич, М.И. Ветровая безопасность конструкций. Теория и практика / М.И. Казакевич – М., 2015. – 287 с.
3. Фершинг, Г.В. Основы аэроупругости / Г.В. Фершинг – М.: Машиностроение, 1984. – 600 с.
4. Азаров, Ю.А. Моделирование в АДТ ЦАГИ аэроупругих колебаний мостовых конструкций при воздействии ветра и разработка средств обеспечения их безопасности / Ю.А. Азаров, Е.В. Брускова, М.С. Комаров, В.В. Назаренко, К.С. Стрелков, Л.Л. Теперин – Труды ЦАГИ выпуск 2729, 2013.
5. Комаров, М.С. О ветровой устойчивости мостовых конструкций / М.С. Комаров, В.В. Назаренко, К.С. Стрелков, Л.Л. Теперин – М.: ДОРОГИ. Инновации в строительстве. – 2011. – №10. – С. 28–30.
6. Телкова, Ю.В. Аэродинамика плохообтекаемых призматических тел в условиях интерференции / Ю.В. Телкова – автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, НГТУ, Новосибирск, 2012.
7. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения. Пер. с англ.; под ред. Маслова Б.Е. / Э. Симиу, Р. Сканлан – М.: Стройиздат, 1984. – 358 с.
8. Казакевич, М.И. Аэродинамика мостов / М.И. Казакевич – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.
9. Davidson, L. An introduction to turbulence models, Department of Thermo and Fluid Dynamics / L. Davidson – Chalmers University of Technology, Publication 97/2, Sweden, 2003.
10. Kai Fan Liaw. Simulation of Flow around Bluff Bodies and Bridge Deck Sections using CFD / Kai Fan Liaw – University of Nottingham. – 2005.

Kozichev Andrei Valerievich

The central aerohydrodynamic institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russia
E-mail: andreikozichev@mail.ru

Paryshev Sergei Emilevich

The central aerohydrodynamic institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russia
E-mail: sergei.paryshev@tsagi.ru

Strelkov Konstantin Sergeevich

The central aerohydrodynamic institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russia
E-mail: ksstrel36@mail.ru

Shustikova Anastasiya Andreevna

The central aerohydrodynamic institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russia
E-mail: shustic09@gmail.com

Teperin Leonid Leonidovich

The central aerohydrodynamic institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russia
E-mail: teperin@mail.ru

Investigation of aeroelastic stability of two bridges under interference conditions

Abstract. The problem of mutual influence of a two parallel road bridges has arisen recently. The new bridges are built close proximity to existing bridges to increase the capacity of highway. The sustainability characteristics of such two parallel road bridges have not been studied enough. Therefore, to safe operation of two parallel bridges, it was necessary to conduct analysis and experimental studies, and also study the behavior of such bridges during exploitation using dynamic monitoring systems. Given their widespread use interference of two close bridges over the river Belaya in Ufa during the operational phase was investigated in this work.

The purpose of the study was to research into the nature and the intensity of aeroelastic oscillation of bridges under conditions of interference, and also to develop recommendations on optimal position of parallel bridges to reduce amplitude of the oscillations.

The results of the study made it possible to estimate the influence of air flow on two close parallel bridges and to offer advice on reduction of vertical oscillation. Overall, the conducted research reveals the most difficult case of interaction. Synchronization of breaking vortices along the span is a random process. In the absence of synchronism, the loads will have a smaller value.

Keywords: aeroelastic stability; bridges aeroelasticity; close parallel bridges; fluid-structure interaction; CFD; vortex shedding; computer modeling; vertical oscillation

REFERENCES

1. Garifullin M.F. (2010). Bafting. [*Buffeting.*] Moscow: Fizmatlit, p. 216.
2. Kazakevich M.I. (2015). Vetrovaya bezopasnost' konstruksiy. Teoriya i praktika. [*Wind safety constructions. Theory and practice.*] Moscow, p. 287.
3. Fershing G.V. (1984). Osnovy aehrouprugosti. [*The basics of aeroelasticity.*] Moscow: Engineering, p. 600.
4. Azarov Yu.A., Bruskova E.V., Komarov M.S., Nazarenko V.V., Strelkov K.S., Teperin L.L. (2013). Modeling in wind tunnels Central Aerohydrodynamic Institute of aeroelastic vibrations of bridge structures under the influence of wind and the development of means to ensure their safety. *Transactions Central Aerohydrodynamic Institute*, 2729.
5. Komarov M.S., Nazarenko V.V., Strelkov K.S., Teperin L.L. (2011). About wind stability of bridge structures. *ROADS. Building Innovation*, 10, pp. 28–30 (in Russian).
6. Telkova Yu.V. (2012). Aehrodinamika plokhootekaemykh prizmaticheskikh tel v usloviyakh interferentsii. [*Aerodynamics of poorly streamlined prismatic bodies under interference.*] Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University.
7. Simiu Eh., Skanlan R. (1984). *The impact of wind on buildings and structures*. [Russ. ed.: *Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya*. Ed. by B.E. Maslova. Moscow: Stroyizdat, p. 368.].
8. Kazakevich M.I. (1987). Aehrodinamika mostov. [*Aerodynamics of bridges.*] Moscow: Transport, p. 240.
9. Davidson L. (2003). An introduction to turbulence models, Department of Thermo and Fluid Dynamics. *Chalmers University of Technology*, 97(2).
10. Kai Fan Liaw (2005). Simulation of Flow around Bluff Bodies and Bridge Deck Sections using CFD. *University of Nottingham*.