

УДК 624.046.3

С. Д. Саленко, Ю. А. Гостеев, А. Д. Обуховский

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ С ТРАПЕЦИЕВИДНЫМИ БАЛКАМИ

Исследована зависимость аэродинамических характеристик типовых пролетных строений с трапециевидными балками: от угла атаки, степени турбулентности набегающего потока, конфигурации поперечного сечения. Получены характерные вихревые структуры, проведено термоанемометрическое зондирование ближнего следа, построены эпюры распределения осредненного давления по поверхности конструкций. Изучены эффекты аэродинамической интерференции двух однотипных пролетных строений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пролетные строения мостов, аэродинамические характеристики, физическое и математическое моделирование, аэродинамическая труба, вычислительная гидроаэродинамика.

The article is devoted to the dependence of aerodynamic characteristics of typical bridge spans with trapeziform girder on the angle of attack, turbulence level of main flotation and, cross-section configuration. Specific vortex structures were obtained. Heat-loss anemometer probing of near wake was performed. Averaged pressure profiles along construction surface were drawn. The effects of aerodynamic interference of two single-type bridge spans were studied.

Key words: bridge spans, aerodynamic characteristics, physical and mathematical simulation, wind tunnel, computational fluid dynamics.

Введение

Строительство современных мостов с длинными пролетами требует особого внимания к ветровым нагрузкам и аэроупругим колебаниям пролетных строений.

Недавними примерами могут служить: обрушение строящегося моста через р. Западная Двина на юго-западном обходе г. Витебска [1]; инцидент 20 мая 2010 г. с мостом в г. Волгограде, едва не закончившийся катастрофой, причиной которого было резонансное вихревое возбуждение либо разновидность срывного флаттера.

Несмотря на большое количество исследований, механизм возбуждения аэроупругих колебаний металлических мостовых конструкций весьма сложен и все еще недостаточно изучен. Многообразие форм возбуждаемых колебаний мостовых строений порождается разнообразием форм поперечных сечений основных конструктивных элементов и структур течения.

Аэродинамические исследования мостовых сооружений необходимо проводить уже на стадии разработки конструкции моста или, во всяком случае, до начала процесса надвижки. Именно на этом этапе кафедрой аэрогидродинамики НГТУ были проведены подобные работы по мостам через р. Томь в г. Томске (1996 г.), р. Иртыш в г. Омске (2001 г.), р. Томь в г. Кемерово (2004 г.) и р. Обь у пос. Красный Яр (2005 г.) [2—6].

Для достоверных расчетов ветровых нагрузок и предотвращения аэроупругих колебаний пролетных строений необходимы исследования аэродинамических характеристик как конкретных проектируемых мостов, так и типовых сечений пролетных строений. К одной из типовых конструкций балочных мостов относятся пролетные строения с коробчатыми трапециевидными балками.

Ранее [7] изучались структура течения и эффекты аэродинамической интерференции при обтекании многобалочных конструкций с балками прямоугольного сечения. Данная работа посвящена экспериментальному и численному исследованию аэродинамических характеристик пролетных строений мостов с коробчатыми балками трапецевидной формы (типа моста в г. Волгограде).

1. Объект и методика исследований

Формы схематизированных поперечных сечений пролетного строения балочного моста приведены в табл. 1. Сечения 1а (пустая балка), 1б (балка с плитой), 1в (балка с плитой и ограждениями) и 1г (балка с плитой, ограждениями и автотранспортом) относятся к 1-й очереди возводимого сооружения, сечения 2а—2г — ко 2-й очереди.

Программа исследований включала продувки в аэродинамической трубе (весовые, дренажные, термоанемометрические и визуализационные испытания) и численные расчеты обтекания моделей указанных конфигураций в диапазонах углов атаки $-5^{\circ} \dots +5^{\circ}$, чисел Рейнольдса $Re = 0,8 \dots 1,5 \cdot 10^5$, в ламинарном (степень турбулентности $\epsilon_{\infty} = 0,5 \%$) и турбулентном ($\epsilon_{\infty} = 8 \%$) ветровых потоках.

Таблица 1

Поперечные сечения исследуемых моделей

№	Форма сечения
1а	
1б	
1в	
1г	
2а	
2б	
2в	
2г	

Для моделирования турбулентных параметров приземного пограничного слоя на срезе сопла аэродинамической трубы устанавливалась решетка. Определение осредненных составляющих суммарных аэродинамических сил и момента проводилось с помощью весовых испытаний (рис. 1). Распределения осредненного давления по поверхности сооружений определялись в процессе дренажных испытаний с использованием современных полупроводниковых датчиков. Измерения пульсаций скорости в окрестности моделей проводились с помощью термоанемометрического комплекса постоянного сопротивления, датчик которого перемещался вдоль и поперек потока. Для визуализации потока использовался метод генерирующей дым проволоки.

Численное моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent с учетом приведенных в [8—9] рекомендаций.

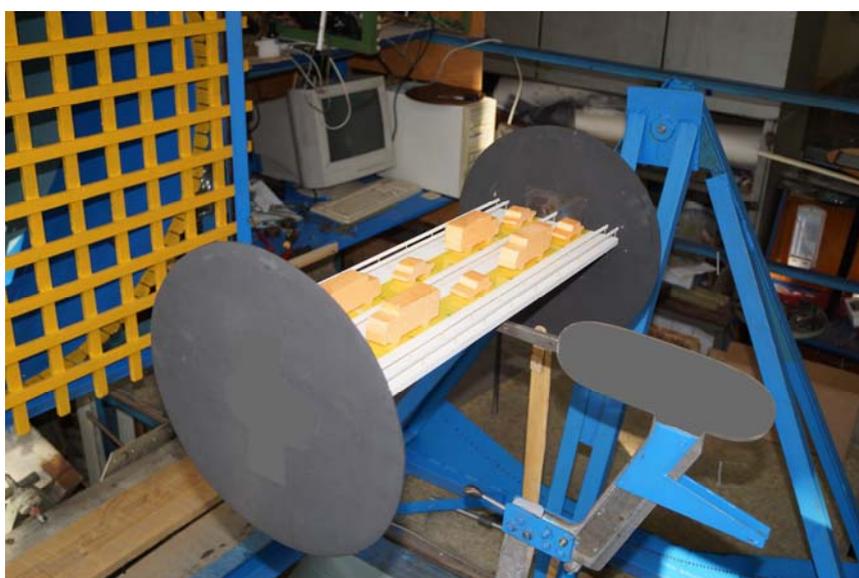


Рис. 1. Испытания модели с ограждениями и автотранспортом

2. Анализ результатов

Основная серия экспериментов была направлена на исследование аэродинамических характеристик схематизированных сечений при различных конфигурациях моделей. При этом изучались: влияние угла атаки α , степени турбулентности набегающего потока ϵ_∞ , плиты перекрытия, ограждений, автотранспорта, интерференция с другим пролетным строением.

Картина течения. Спектры обтекания исследованных поперечных сечений демонстрируют в целом сложный нестационарный характер потока с образованием протяженных отрывных зон и ярко выраженной вихревой дорожки (рис. 2). Отрыв потока инициируется передними кромками контура. Отклоненный вниз поток успевает присоединиться к наветренной наклонной стенке и вновь срывается с левого оребрения нижней стенки. Установка ограждений приводит к возникновению в их окрестности зон повышенных скоростей потока, примерно в 1,5 раза превышающих максимальные местные скорости без ограждений.

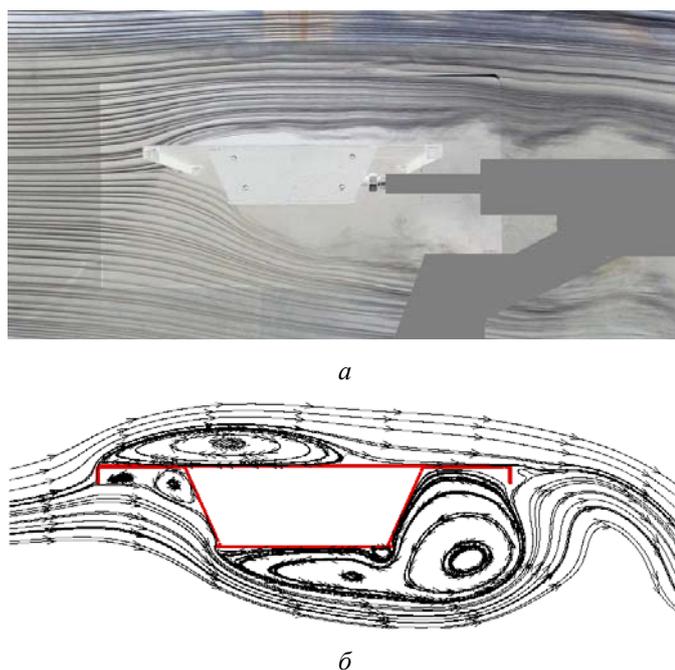


Рис. 2. Мгновенная картина линий тока для модели с плитой 1б: *a* — эксперимент; *б* — расчет

Пульсационные характеристики. Термоанемометрические измерения в аэродинамическом следе за моделями подтверждают наличие вихревой дорожки Кармана (рис. 3).

В табл. 2 приведены опытные и расчетные данные по числам Струхали сечений $Sh = f_a H / V_\infty$, где f_a — частота схода вихрей, H — поперечный размер балки, V_∞ — средняя составляющая скорости ветра на уровне строения.

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные данные по числам Струхали

Сечение	Поток	Sh	
		Эксперимент	Расчет
1а	Ламинарный	0,109	0,102
	Турбулентный	0,093	—
1в	Ламинарный	0,073	0,067
	Турбулентный	0,096	0,086
2в	Ламинарный	0,087	0,104
	Турбулентный	0,113	—

Оценим возможность возникновения резонансных аэроупругих колебаний схематизированного пролетного строения 1в, обусловленных срывом вихрей Кармана. Приняв собственную частоту колебаний конструкции $f = 0,4$ Гц (по данным видеоматериалов в сети о колебаниях моста в мае 2010 г.), поперечный размер балки строения $H = 3,3$ м, находим, что критическая скорость ветра составит 14...18 м/с.

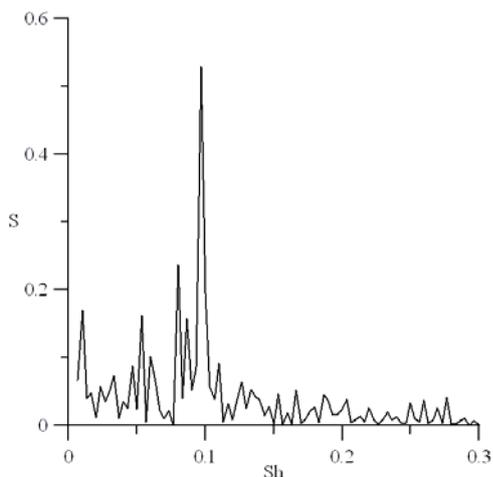


Рис. 3. Энергетический спектр пульсаций скорости за моделью с сечением 1в (турбулентный поток)

Распределение давления по поверхности конструкций. Дренажные испытания выявили качественно схожие картины распределения ветрового давления по поверхности строений при ламинарном и турбулентном обтекании (рис. 4—5).

Для строения 1-й очереди (сечение 1в) на наветренной стенке балки и прилегающей к ней нижней поверхности плиты возникают области повышенного давления, на остальной поверхности — области разрежения (рис. 4).

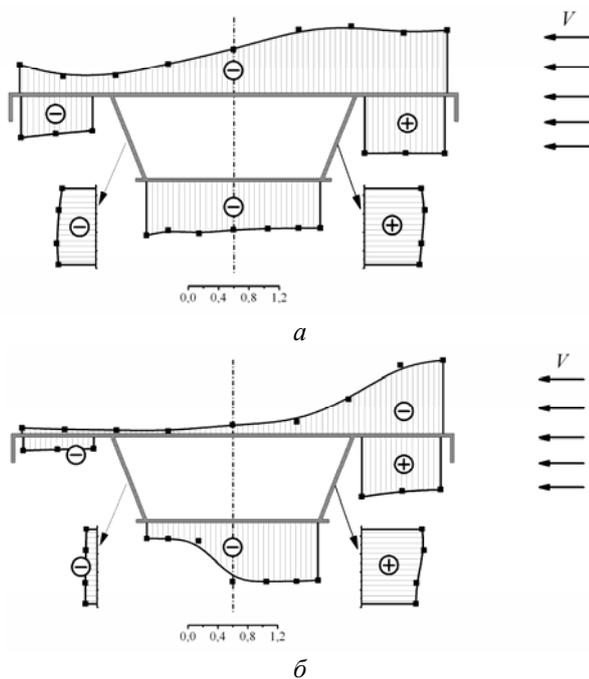


Рис. 4. Распределение коэффициента давления по поверхности строения 1-й очереди: а — ламинарный поток; б — турбулентный поток

Для 2-й очереди моста (сечение 2в) присутствие вверх по потоку строения с аналогичной балкой приводит к исчезновению зон повышенного давления, вся поверхность расположенной ниже по потоку модели находится в области разрежения (рис. 5).

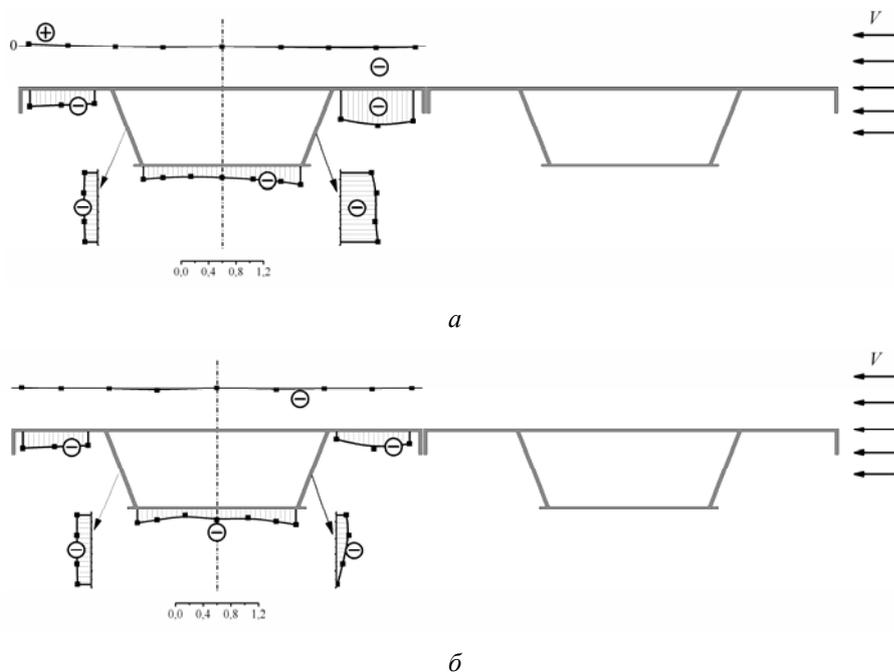


Рис. 5. Распределение коэффициента давления по поверхности строения 2-й очереди: *a* — ламинарный поток; *б* — турбулентный поток

Аэродинамические коэффициенты. Часть полученных данных приведена на рис. 6—9. (При определении коэффициента лобового сопротивления c_{xa} использовалась площадь фронтальной проекции модели, коэффициента подъемной силы c_{ya} — площадь проекции модели в плане).

Степень турбулентности потока сильно влияет на коэффициент подъемной силы и в меньшей мере — на коэффициент лобового сопротивления. При этом в диапазоне углов атаки от -5° до 5° для всех сечений, оснащенных плитой, увеличение ε_∞ приводит к уменьшению c_{ya} .

Перекрытие уменьшает лобовое сопротивление строения (рис. 6), делая сечение более протяженным по потоку (1б). Ограждения (1в) и автотранспорт (1г), наоборот, увеличивают лобовое сопротивление модели за счет увеличения площади миделевого сечения, особенно велико влияние автотранспорта (1г).

Величина подъемной силы сложным образом зависит от конфигурации модели. Максимальное значение коэффициента $c_{ya \max} = 0,914$ реализуется для модели балки с перекрытием при $\alpha = 2,5^\circ$. Ограждения и автотранспорт уменьшают подъемную силу, очевидно из-за провоцирования более раннего срыва потока (рис. 7).

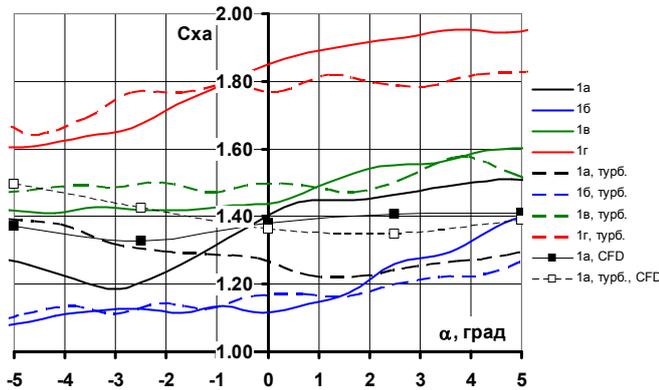


Рис. 6. Влияние угла атаки, степени турбулентности потока и конфигурации поперечного сечения на коэффициент лобового сопротивления пролетного строения 1-й очереди: сплошные линии — ламинарный поток, пунктирные линии — турбулентный поток («турб.»), 1а, ..., 1г — номера сечений, CFD — расчетные данные

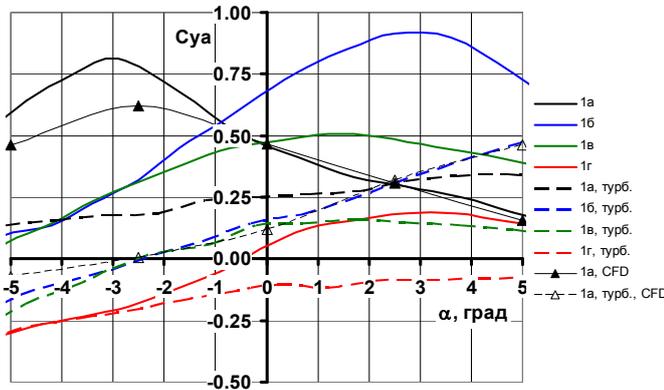


Рис. 7. Влияние угла атаки, степени турбулентности потока и конфигурации поперечного сечения на коэффициент подъемной силы пролетного строения 1-й очереди

Довольно высокие значения c_{ya} при отрицательных углах атаки ($c_{ya \max} = 0,812$ при $\alpha = -2,9^\circ$) имеет в ламинарном потоке трапецевидная балка без плиты (1а). У остальных сечений максимум подъемной силы достигается при положительных углах атаки. Данная особенность воспроизводится и при численном моделировании (рис. 7).

Для балки без перекрытия (1а) в ламинарном потоке велика вероятность возникновения галопирования (критерий Ден-Гартога [10] $A = -6,31 < 0$).

На лобовом сопротивлении строения 2-й очереди сильно и неоднозначно сказывается аэродинамическая интерференция с расположенным вверх по потоку пролетным строением 1-й очереди (рис. 8). Как видно из рисунка, в процессе возведения и эксплуатации c_{xa} строения может меняться в довольно широких пределах, от $-0,37$ до $0,6$. На стадии возведения на балку без перекрытия (2а), обдуваемую ламинарным потоком, действует подсосывающая

сила. В турбулентном потоке эффект воздействия следа от наветренного строения ослабевает. Присутствие на проезжей части строения 1-й очереди автотранспорта приводит в случае ламинарного потока к некоторому увеличению лобового сопротивления, в случае турбулентного потока — к его резкому падению (2б). После оснащения балки ограждениями и плитой коэффициент лобового сопротивления строения 2-й очереди вновь возрастает (2в) до уровня 0,4...0,6, что составляет примерно 30 % от c_{xa} изолированного строения (рис. 6, кривая 1в). На стадии эксплуатации, когда оба строения пропускают автотранспорт, лобовое сопротивление вновь уменьшается (2г).

Коэффициент подъемной силы строения 2-й очереди в процессе возведения и эксплуатации может меняться в более узких пределах: c_{ya} возрастает с увеличением угла атаки от $-0,29...-0,11$ при $\alpha = -5^\circ$, до $-0,03...0,28$ при $\alpha = 5^\circ$ (рис. 9).

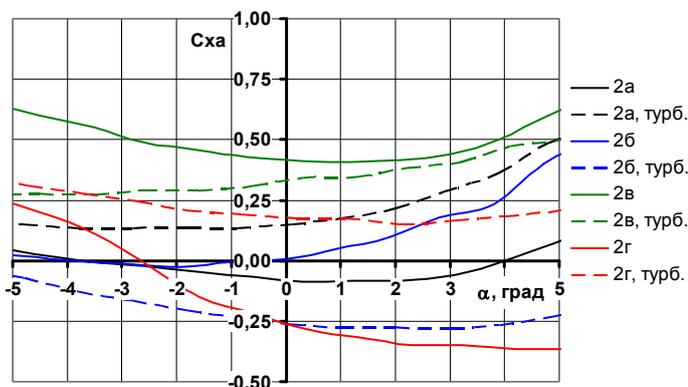


Рис. 8. Влияние угла атаки, степени турбулентности потока и конфигурации поперечного сечения на коэффициент лобового сопротивления пролетного строения 2-й очереди: сплошные линии — ламинарный поток, пунктирные линии — турбулентный поток («турб.»), 2а, ..., 2г — номера сечений

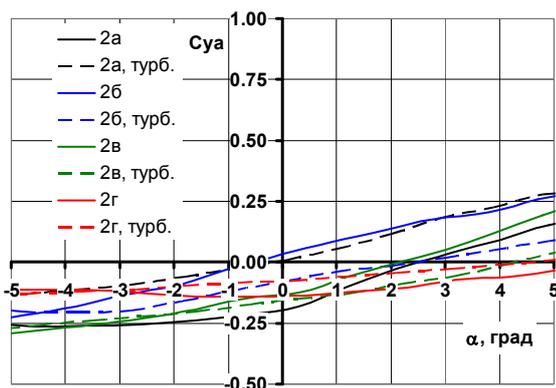


Рис. 9. Влияние угла атаки, степени турбулентности потока и конфигурации поперечного сечения на коэффициент подъемной силы пролетного строения 2-й очереди: сплошные линии — ламинарный поток, пунктирные линии — турбулентный поток («турб.»), 2а, ..., 2г — номера сечений

Заключение

Ветровая нагрузка на схематизированное пролетное строение моста в г. Волгограде носит сложный нестационарный характер. Спектры обтекания демонстрируют обширные отрывные зоны, захватывающие существенные части верхней и нижней поверхностей обтекаемого контура. Глобальный отрыв инициируется передними кромками, локальные отрывы — малыми элементами контура (оребрения, ограждения).

В следе за сооружением присутствует выраженная вихревая дорожка, что является предпосылкой для возникновения ветрового резонанса. Диапазон чисел Струхала для различных конфигураций составляет $Sh = 0,073 \dots 0,113$, что соответствует значению резонансной скорости ветра $12 \dots 18$ м/с для натурного строения.

Для строения 1-й очереди обращают на себя внимание высокие значения (до $0,5 \dots 0,7$) коэффициента подъемной силы при нулевом угле атаки, способные вызвать вертикальные колебания строения при горизонтальных порывах ветра. В ламинарном потоке на стадии возведения (без перекрытия) строение с большой вероятностью подвержено галопированию из-за отрицательного наклона зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки.

Аэродинамическая интерференция приводит к существенным изменениям лобового сопротивления заветренного пролетного строения 2-й очереди моста на стадиях возведения и эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В Республике Беларусь рухнул строящийся мост. URL: <http://forum.bridgeart.ru> (дата обращения : 12.01.2011).
2. Саленко С. Д. Нестационарная аэродинамика плохообтекаемых многобалочных конструкций : дис... д-ра. техн. наук. Новосибирск, 2005. 332 с.
3. Саленко С. Д. Особенности нестационарных аэродинамических характеристик многобалочных конструкций // Научный вестник НГТУ. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. С. 131—142.
4. Аэродинамические испытания Томского моста / С. Д. Саленко, А. Д. Обуховский, В. И. Акопов, А. Б. Канунников // Научный вестник НГТУ, Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. С. 143—150.
5. Саленко С. Д., Обуховский А. Д., Телкова Ю. В. Гашение аэроупругих колебаний пролетного строения моста через реку Обь // В мире научных открытий. Сер.: Математика. Механика. Информатика. Красноярск : Научно-инновационный центр, 2011. № 1 (13). С. 167—176.
6. Саленко С. Д., Обуховский А. Д., Телкова Ю. В. Пассивные гасители аэроупругих колебаний пролетного строения моста на стадии монтажа // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2011. Вып. 2(16). URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru>. (дата обращения : 12.12.2011).
7. Исследование структуры течения в окрестности двух балок квадратного поперечного сечения в условиях интерференции / С. Д. Саленко, А. Д. Обуховский, Ю. А. Гостеев, Ю. В. Телкова // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 2. С. 313—323.
8. Franke J., Hirsch C., Jensen A. G., Krus H. W., Schatzmann M., Westbury P. S., Miles S. D., Wisse J. A., Wright N. G. Recommendations on the use of CFD in wind engineering. URL: <http://www.kuleuven.be/bwf/projects/annex41/protected/data/Recommendations%20for%20CFD%20in%20wind%20engineering.pdf> (access date : 15.01.2011).
9. Youngl M. E., Ooi A. Turbulence Models and Boundary Conditions for Bluff Body Flow // 15th Australasian Fluid Mechanics Conference. The University of Sydney. Sydney, Australia 13—17, December 2004.
10. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М. : Стройиздат, 1984. 360 с.

1. V Respublike Belarus' rukhnul stroyashchiysya most. URL: <http://forum.bridgeart.ru> (data obrashcheniya : 12.01.2011).
2. *Salenko S. D.* Nestatsionarnaya aerodinamika plokhobtekaemykh mnogobalochnykh konstruksiy : dis... d-ra. tekhn. nauk. Novosibirsk, 2005. 332 s.
3. *Salenko S. D.* Osobennosti nestatsionarnykh aerodinamicheskikh kharakteristik mnogobalochnykh konstruksiy // Nauchny vestnik NGTU. Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2004. S. 131—142.
4. Aerodinamicheskie ispytaniya Tomskogo mosta / S. D. Salenko, A. D. Obukhovskiy, V. I. Akopov, A. B. Kanunnikov // Nauchny vestnik NGTU, Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2004. S. 143—150.
5. *Salenko S. D., Obukhovskiy A. D., Telkova Yu. V.* Gashenie aerouprugikh kolebaniy proletnogo stroeniya mosta cherez reku Ob' // V mire nauchnykh otkrytiy. Ser.: Matematika. Mekhanika. Informatika. Krasnoyarsk : Nauchno-innovatsionnyy tsentr, 2011. № 1 (13). S. 167—176.
6. *Salenko S. D., Obukhovskiy A. D., Telkova Yu. V.* Passivnye gasiteli aerouprugikh kolebaniy proletnogo stroeniya mosta na stadii montazha // Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya. 2011. Vyp. 2(16). URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru>. (data obrashcheniya : 12.12.2011).
7. Issledovanie struktury techeniya v okrestnosti dvukh balok kvadratnogo poperechnogo secheniya v usloviyakh interferentsii / S. D. Salenko, A. D. Obukhovskiy, Yu. A. Gosteev, Yu. V. Telkova // Teplofizika i aeromekhanika. 2010. T. 17. № 2. S. 313—323.
8. *Franke J., Hirsch C., Jensen A. G., Krus H. W., Schatzmann M., Westbury P. S., Miles S. D., Wisse J. A., Wright N. G.* Recommendations on the use of CFD in wind engineering. URL: <http://www.kuleuven.be/bwf/projects/annex41/protected/data/Recommendations%20for%20CFD%20in%20wind%20engineering.pdf> (access date : 15.01.2011).
9. *Youngl M. E., Ooi A.* Turbulence Models and Boundary Conditions for Bluff Body Flow // 15th Australasian Fluid Mechanics Conference. The University of Sydney. Sydney, Australia 13—17, December 2004.
10. *Simiu E., Skanlan R.* Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya. M. : Stroyizdat, 1984. 360 s.

© Саленко С. Д., Гостеев Ю. А., Обуховский А. Д., 2014

Поступила в редакцию
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Саленко С. Д., Гостеев Ю. А., Обуховский А. Д. Аэродинамические характеристики типовых пролетных строений мостов с трапециевидными балками // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 1(31). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SalenkoGosteevObukhovsky-2014_1\(31\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SalenkoGosteevObukhovsky-2014_1(31).pdf)