

УДК 533.682

## **Аэродинамические исследования типовых многобалочных конструкций\***

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

*Новосибирский государственный технический университет*

E-mail: agd@craft.nstu.ru

Исследована зависимость аэродинамических характеристик типовых многобалочных пролетных строений мостов от угла атаки, степени турбулентности набегающего потока, числа балок и расстояния между ними. Для модели трехбалочного пролетного строения получены характерные вихревые структуры, проведено термоанемометрическое зондирование ближнего следа, построены эпюры распределения осредненного давления.

**Ключевые слова:** пролетные строения мостов, аэродинамические характеристики, физическое и математическое моделирование, аэродинамическая труба, вычислительная гидроаэродинамика.

### **Введение**

Строительство современных мостов с длинными пролетами требует особого внимания к ветровым нагрузкам и аэроупругим колебаниям пролетных строений. Учет этих факторов способствует безопасности сооружений. В противном случае могут случаться инциденты: в 1993 г. у моста через р. Обь в г. Барнауле [1] на надвигаемой трехбалочной конструкции при скорости ветра  $13 \div 14$  м/с возникли интенсивные колебания с размахом около метра, создавшие угрозу возводимому сооружению; обрушение строящегося моста через р. Западная Двина на юго-западном обходе г. Витебска [2]; 20 мая 2010 г. случай с мостом в г. Волгограде, едва не закончившийся катастрофой, причиной которого был ветровой резонанс (резонансное вихревое возбуждение) либо разновидность срывного флаттера.

Несмотря на большое количество исследований, механизм возбуждения аэроупругих колебаний плохообтекаемых тел, каковыми являются металлические мостовые конструкции, 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 не в процессе строительства, а на стадии разработки конструкции моста, или, во всяком случае, до начала процесса надвигки. 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.) [1, 3–7].

---

\* Работа выполнена в рамках ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010–2015 гг.)» (гос. контракт № УД 47/182 от 12 октября 2011 г.).

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.

Одной из типовых конструкций балочных мостов являются пролетные строения с несколькими относительно узкими коробчатыми балками. На стадии возведения (без перекрывающей плиты) такие сооружения могут быть подвержены интенсивным аэроупругим колебаниям в ветровом потоке [1].

Ранее [8] уже изучались структура течения и эффекты аэродинамической интерференции при обтекании системы параллельно расположенных балок с квадратным поперечным сечением. Настоящая работа посвящена экспериментальному и численному исследованию аэродинамических характеристик типовых многобалочных конструкций пролетных строений мостов с коробчатыми балками.

### 1. Описание моделей и программа исследований

В многобалочных мостовых сооружениях несущие балки располагаются тандемно по отношению друг к другу. Другими особенностями являются небольшой уклон полотна и наличие на обтекаемом контуре ребер жесткости.

Геометрические размеры исследуемых поперечных сечений задаются следующими параметрами (рис. 1):  $H$  и  $B$  — габаритные высота и ширина сечения,  $B_6$  — ширина балки,  $L_1$  — межбалочное расстояние,  $L_p$  — длина ребра.

Форма и размеры сечений приведены в табл. 1. Модели выполнялись без уклона, имели высоту и ширину балки  $H = 45,4$  мм и  $B_6 = 34$  мм ( $B_6 / H = 0,75$ ), длину ребра  $L_p = 3,3$  мм.

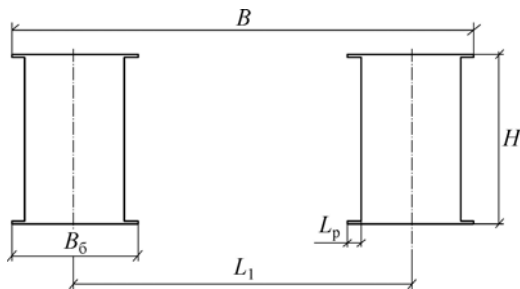
Секционные модели пролетных строений изготавливались из материала ПВХ, шероховатость поверхности  $\approx 40$  мкм, погрешность линейных размеров составляла не более 0,3 мм.

В ходе выполнения работы изучались следующие вопросы.

1) Влияние формы поперечного сечения на аэродинамические характеристики мостового сооружения (коэффициенты сил и момента, число Струхала, распределение давления по поверхности), в том числе на аэродинамическую интерференцию балок.

2) Влияние степени турбулентности ветрового потока. Исследования аэродинамических характеристик проводились в малотурбулентном (гладком) и турбулентном (за решеткой) потоках.


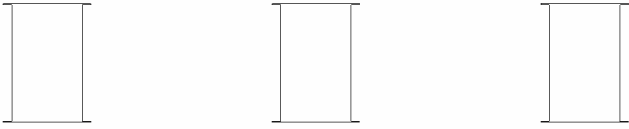
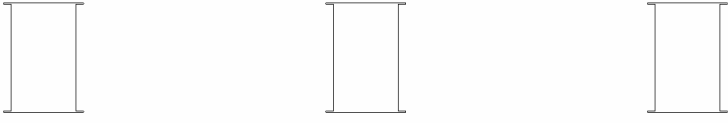
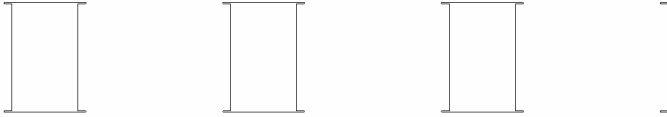
Программа исследований включала продувки в аэродинамической трубе (весовые, дренажные, термоанемометрические и визуализационные испытания) и численные расчеты обтекания приведенных выше конфигураций в диапазоне углов атаки  $-10^\circ \dots +10^\circ$  в гладком и турбулентном ветровых потоках.



Полный комплекс аэродинамических исследований проводился для наиболее интересного типового сечения 3,  $b$ , близкого к сечению пролетного строения моста в г. Барнауле. Для остальных конфигураций проводились весовые испытания.

Рис. 1. Геометрические параметры исследуемых сечений.

Таблица 1

Описание исследуемых сечений		
№	Относительные размеры, форма сечения	Ширина модели $B$ , мм
1	$B/H = 0,75$	34
2	$B/H = 2,75, L_1/H = 2$ 	124
3a	$B/H = 5,35, L_1/H = 2,3$ 	242,8
3b	$B/H = 6,75, L_1/H = 3$ 	306,4
4	$B/H = 6,75, L_1/H = 2$ 	306,4

## 2. Методика исследований

Продувки моделей проводились на дозвуковой аэродинамической трубе Т-503 замкнутого типа с открытой рабочей частью, имеющей основные характеристики:

- диапазон скоростей от 0,5 до 60 м/с;
- диаметр рабочей части — 1,2 м, длина — 2 м;
- мощность привода вентилятора — 165 кВт;
- степень турбулентности без турбулизирующих устройств около 0,3 %.

Аэродинамическая труба оснащена четырехступенным координатником, позволяющим перемещать измерительный зонд практически по всему объему рабочей части. Точность перемещения по продольной и поперечной осям — 1 мм, по вертикальной оси — 0,5 мм, по углу  $\beta$  — 0,5°.

Для моделирования турбулентных параметров приземного пограничного слоя на срезе сопла аэродинамической трубы устанавливалась решетка. Полученные спектральные характеристики потока близки к данным других авторов. В месте установки моделей среднее значение степени турбулентности потока  $\varepsilon$  составляло около 8 %, изменение  $\varepsilon$  по потоку в окрестности модели около  $\pm 1,5$  %.

Определение осредненных составляющих суммарных аэродинамических сил и момента проводилось с помощью весовых испытаний. Для уменьшения влияния эффектов, связанных с конечностью размаха, по бокам модели устанавливались концевые шайбы.

В настоящей работе кроме традиционных поправок при весовых испытаниях (на взаимное влияние компонент весов, на влияние проекций веса модели и весов при изменении угла тангажа, на угол атаки от скоса потока, на деформации державки и упругих элементов тензовесов, на загромождение рабочей части моделью, блокинг-эффект и пр.) вводились поправки на конечное удлинение модели и влияние концевых шайб.

Для отладки методики и проверки правильности введения поправок предварительно были проведены весовые испытания призмы квадратного поперечного сечения в гладком потоке. Испытания показали хорошее совпадение с известными результатами (коэффициент лобового сопротивления  $\bar{c}_{xa} = 2,15$  в проводимых экспериментах,  $\bar{c}_{xa} = 2,04 \div 2,3$  по данным других авторов,  $\bar{c}_{xa} = 2,1$  по СНиП [9] и Еврокоду [10]).

Оценки показали, что погрешность определения коэффициента подъемной силы при доверительном интервале  $P = 95\%$  составляет около  $2\%$ . Аналогичные погрешности получаются и для коэффициентов сопротивления и момента.

Распределения осредненного давления по поверхности сооружений определялись в процессе дренажных испытаний с использованием современных полупроводниковых датчиков. Погрешность определения осредненного коэффициента давления при доверительном интервале  $P = 95\%$  составляла около  $2\%$ .

Измерения пульсаций скорости в окрестности моделей проводились с помощью термоанемометрического комплекса постоянного сопротивления, датчик которого с помощью координатника перемещается вдоль и поперек потока. Погрешность определения термоанемометром мгновенной скорости потока при доверительном интервале  $P = 95\%$  составляла около  $1\%$ . Для визуализации потока использовался метод генерирующей дым проволоки.

Основная часть численных исследований проводилась для моделей типовых многобалочных строений. Некоторые задачи решались и для натуральных объектов с целью выявления влияния числа Рейнольдса.

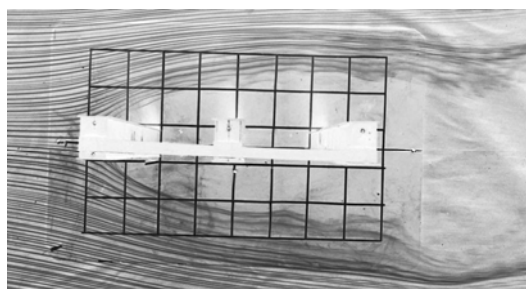
При постановке компьютерных экспериментов учитывались приведенные в работах [11–16] выводы и рекомендации. Использовалась математическая модель нестационарного изотермического течения несжимаемой жидкости. Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса дополнялись одной из моделей турбулентности.

Для отработки численной методики решен ряд тестовых задач. Изучалась воспроизводимость аэродинамических характеристик балок прямоугольного (в частности, квадратного) сечения и их тандемной системы с учетом влияния модели турбулентности, параметров сетки и численного алгоритма. Для большинства конфигураций получено удовлетворительное (в пределах  $5 \div 20\%$ ) согласование с литературными данными, а также относительно слабое влияние числа Рейнольдса  $Re = V_\infty H / \mu$  (в диапазоне  $0,3 \cdot 10^5 \div 43 \cdot 10^5$ ). Последним фактом обосновывается применимость в численных аэродинамических исследованиях моделей пролетных строений мостов.

### 3. Результаты исследований и их анализ

**Картина течения.** Спектры обтекания исследованных поперечных сечений демонстрируют сложный нестационарный характер потока с образованием отрывных зон и выраженной вихревой дорожки. Отрыв потока инициируется угловыми точками на наветренной части передней балки. Вихревые структуры могут зародиться также и в межбалочном пространстве.

Рис. 2. Визуализация обтекания трехбалочного строения при расположении нихромовой проволоки по потоку перед первой балкой (обращенные цвета).



При визуализации обтекания модели трехбалочного строения (сечение 3b) нихромовую проволоку сначала расположили по потоку перед первой балкой (рис. 2). В результате были получены четкие границы зоны отрыва потока от передней балки и начало формирования дорожки Кармана. Но при этом осталась не ясна картина обтекания межбалочных пространств.

Расположение нихромовой проволоки по потоку между первой и второй балками, а также между второй и третьей позволило выявить, что в межбалочных пространствах образуются застойные отрывные зоны, для которых характерны хаотические турбулентные перемешивания потока при скоростях намного меньших скорости набегающего потока (рис. 3), а в аэродинамическом следе такой конструкции формируется единая вихревая дорожка (рис. 4), наличие которой является основной причиной возникновения аэроупругих колебаний сооружения. Согласно рис. 5, позади третьей по потоку балки отчетливо видно зарождение одиночного вихря.

**Распределение давления по поверхности конструкций.** Продувки трехбалочной модели (сечение 3b) проводились как в гладком, так и в турбулизированном потоках при числах Рейнольдса по высоте сечения  $(0,8 \div 1,3) \cdot 10^5$ .

Эпюры осредненного давления представлены на рис. 6 и 7. Заметим, что для анализа аэроупругих колебаний важно также знать распределение пульсационной составляющей давления.

Как видно из рисунков, основной вклад в сопротивление всей конструкции вносит передняя балка. Максимальный подсос наблюдается, как правило, на верхних и нижних стенках передней и задней балок. Судя по распределениям давления по периметру центральной и задней балок, коэффициенты сопротивления этих балок могут быть отрицательными.

Отличия в коэффициентах давления на обращенных друг к другу вертикальных стенках передней и центральной, а также центральной и задней балок по разным сторонам соответствующих межбалочных пространств говорит о том, что в застойных зонах между балками развиваются нестационарные структуры.

Независимо от угла атаки  $\alpha$  и степени турбулентности набегающего потока  $\varepsilon_\infty$ , эпюры ветрового давления на стенках передней балки близки к линейным и практически постоянны на наветренной и подветренной ее стенках. Центральная балка оказывается

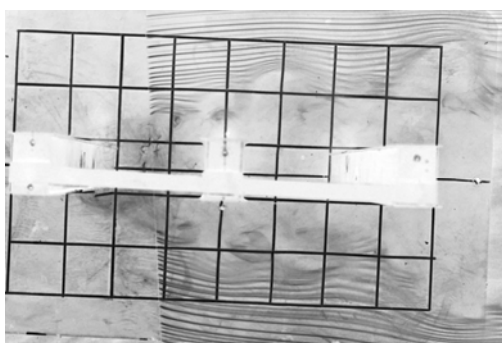


Рис. 3. Визуализация обтекания трехбалочного строения при расположении нихромовой проволоки по потоку перед второй балкой (обращенные цвета).

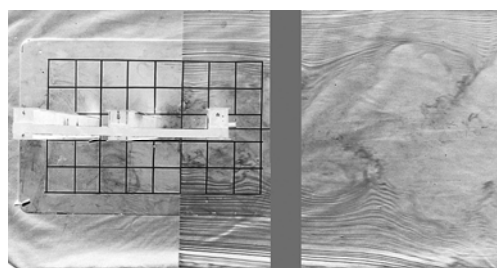


Рис. 4. Визуализация обтекания трехбалочного строения при расположении нихромовой проволоки по потоку перед третьей балкой (обращенные цвета).

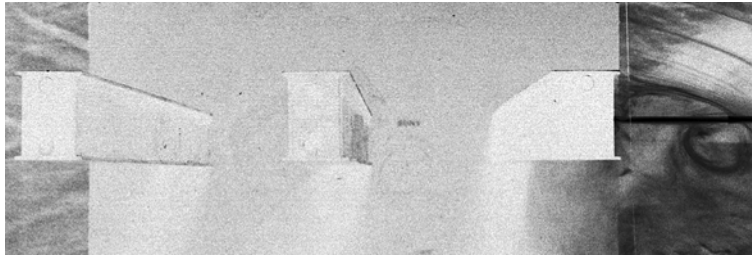


Рис. 5. Визуализация обтекания трехбалочного строения при расположении нихромовой проволоки по потоку за третьей балкой (обращенные цвета).

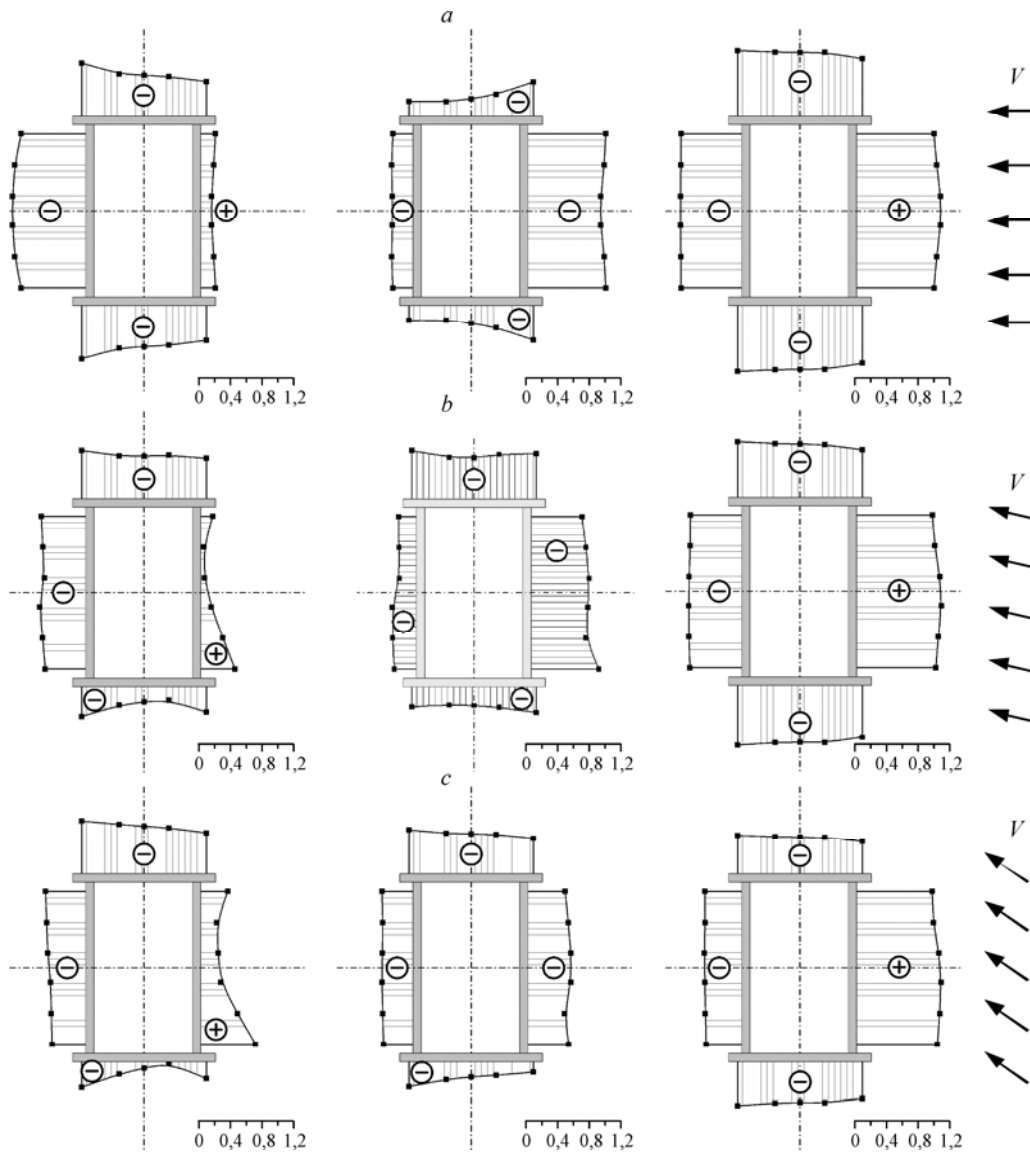


Рис. 6. Распределение коэффициента давления по поверхности трехбалочной модели в гладком потоке в зависимости от угла атаки:  $\alpha = 0$  (a),  $5$  (b),  $10^\circ$  (c).

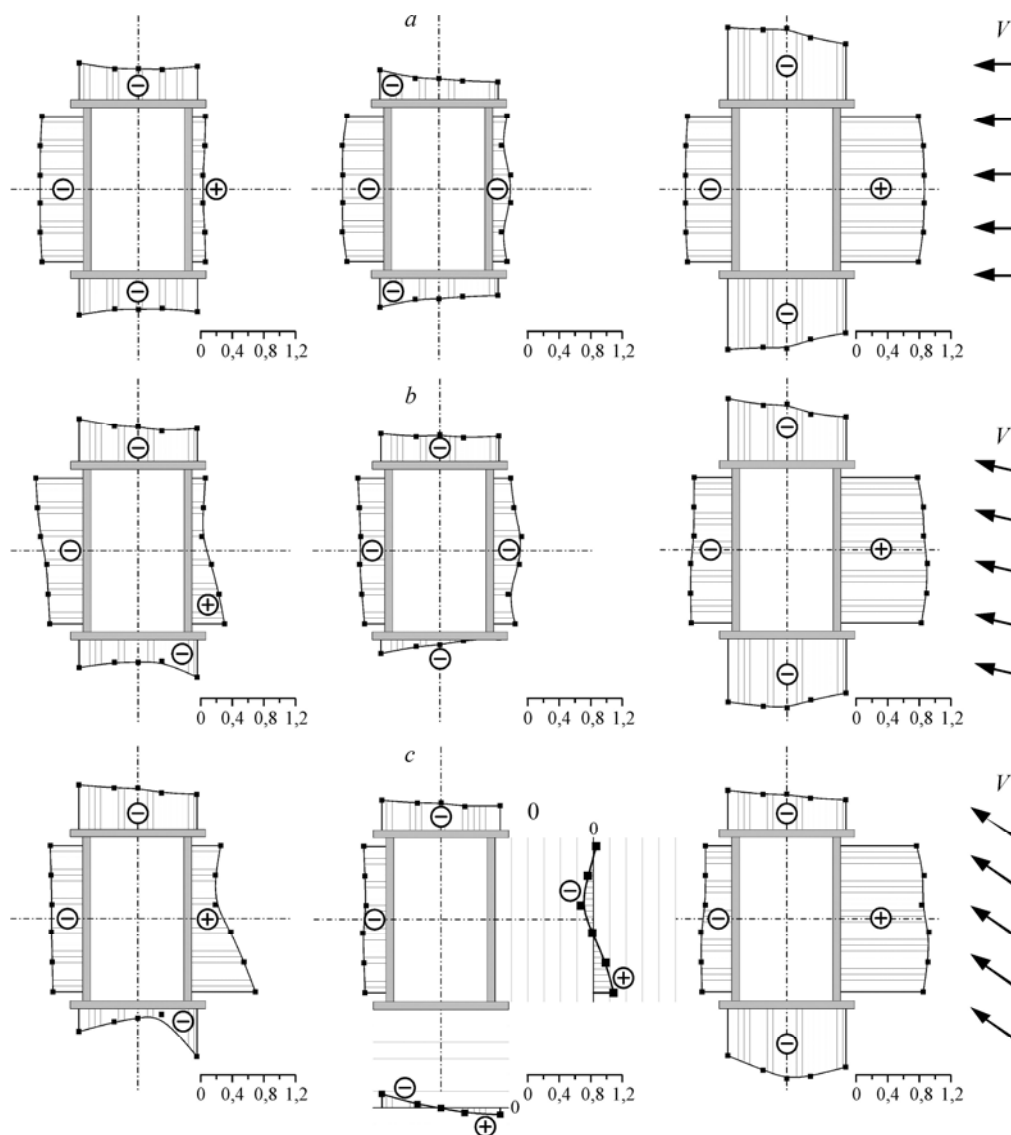


Рис. 7. Распределение коэффициента давления по поверхности трехбалочной модели в турбулентном потоке в зависимости от угла атаки:  $\alpha = 0$  (a),  $5^\circ$  (b),  $10^\circ$  (c).

в аэродинамическом следе передней и поэтому распределение осредненного давления на ее стенках наиболее чувствительно к изменению  $\alpha$  и  $\varepsilon_\infty$ . Эпюры давления на стенках задней балки при указанном изменении свой качественный характер не меняют.

**Характеристики ближнего следа.** Измерения профилей осредненной скорости  $\bar{V}$  и степени турбулентности  $\varepsilon$  проводились в вертикальных сечениях аэродинамического следа на расстоянии  $3H$  от модели трехбалочной конфигурации ( $L_1/H = 3$ ), расположенной под нулевым углом атаки. Вертикальная координата отсчитывалась от оси симметрии сечения. По результатам измерений строились спектры мощности пульсаций скорости в характерных точках.

Профили скорости и степени турбулентности представлены на рис. 8. Видно, что в турбулизированном потоке дефицит скорости в следе за моделью возрастает.

Спектральный анализ выявил присутствие в ближнем следе пульсационной составляющей скорости с числом Струхала  $Sh = fH/V_\infty = 0,084$  для гладкого и  $0,089$  для турбулентного потоков. (Для одиночной балки  $Sh = 0,104$  и  $0,106$  соответственно.)

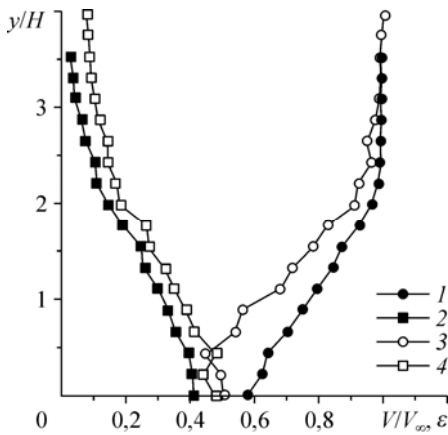


Рис. 8. Профили относительной осредненной скорости и степени турбулентности за трехбалочной моделью: гладкий поток —  $V/V_\infty$  (1),  $\varepsilon$  (2), турбулентный поток —  $V/V_\infty$  (3),  $\varepsilon$  (4).

Оценим возможность возникновения резонансных аэроупругих колебаний пролетных строений, обусловленных срывом вихрей Кармана. Пролетные строения балочных мостов могут иметь (особенно на стадии монтажа) довольно низкую собственную частоту колебаний  $f_{пр} = 0,3 \div 1$  Гц. Из равенства частот  $f$  и  $f_{пр}$  получаем оценку для критической скорости ветра:  $V_{кр} = f_{пр} H / Sh$ . Тогда при попе-

речном размере сооружения  $H = 3$  м критическая скорость оказывается в диапазоне  $8,5 \div 35,7$  м/с, в который попадают и ветры умеренной силы.

**Аэродинамические коэффициенты.** При определении коэффициента лобового сопротивления использовалась площадь фронтальной проекции модели  $S_{фр}$ , коэффициентов подъемной силы и момента — площадь проекции модели в плане  $S_{пл}$  и габаритная ширина  $B$ .

Пример зависимости осредненных аэродинамических коэффициентов от угла атаки  $\alpha$  и степени турбулентности  $\varepsilon_\infty$  набегающего потока приведен на рис. 9.

Для всех исследованных моделей зависимость коэффициента лобового сопротивления  $\bar{c}_{xa}$  от угла атаки носит приближенно симметричный характер, что объясняется симметричной формой поперечных сечений.

Коэффициент подъемной силы  $\bar{c}_{ya}$  однобалочной конструкции убывает с увеличением  $\alpha$ , для многобалочных строений  $\bar{c}_{ya}$  демонстрирует сложное поведение, со сменами знака производной  $\bar{c}_{ya}^\alpha \equiv \partial \bar{c}_{ya} / \partial \alpha$ .

Влияние  $\varepsilon_\infty$  на  $\bar{c}_{xa}$  одно- и двухбалочных строений невелико, причем только для одиночной балки  $\bar{c}_{xa}$  уменьшается с ростом  $\varepsilon_\infty$ . В то же время коэффициент сопротивления трех- и четырехбалочных строений в турбулентном потоке существенно, на 20 ÷ 50 %, возрастает. Особенно чувствительным в этом отношении оказывается сечение 3b (рис. 9), что объясняется негативной интерференцией, приводящей к существенному снижению разрежения на передней стенке центральной балки (см. рис. 6, а и 7, а).

Влияние турбулентности набегающего потока на коэффициент подъемной силы сказывается в уменьшении производной  $\bar{c}_{ya}$ .

Интересно, что для сечения 3b это приводит к качественному изменению зависимости  $\bar{c}_{ya} = f(\alpha)$  (рис. 9).

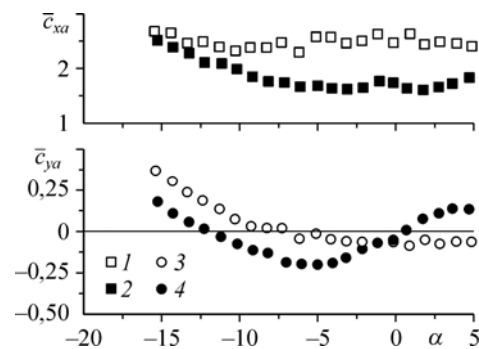


Рис. 9. Влияние угла атаки и степени турбулентности набегающего потока на аэродинамические характеристики трехбалочной конструкции ( $L_1/H = 3$ ): гладкий поток (1, 2), турбулентный поток (3, 4).



Таблица 2

Влияние количества балок на аэродинамические характеристики конструкции  
(межбалочное расстояние  $L_1/H = 2$ )

$n$	$B/H$	$\bar{c}_{xa0}$		$\bar{c}_{ya0}^\alpha$		$A$	
		гладк.	турб.	гладк.	турб.	гладк.	турб.
1	0,75	2,318	2,099	-2,956	-3,827	0,135	-1,028
2	2,75	1,213	1,246	2,853	1,071	3,668	1,908
4	6,75	1,295	1,757	3,109	2,392	3,537	2,973

В табл. 2, 3 представлены данные по влиянию количества балок  $n$  и относительного межбалочного расстояния  $L_1/H$  на аэродинамические характеристики модели при нулевом угле атаки. В последних столбцах приведены значения критерия Ден-Гартога  $A = \bar{c}_{xa0} S_{\text{фр}} / S_{\text{пл}} + \bar{c}_{ya0}^\alpha$ , ( $\bar{c}_{xa0} = \bar{c}_{xa}(0)$ ,  $\bar{c}_{ya0}^\alpha = \bar{c}_{ya}^\alpha(0)$ ), определяющего вероятность развития галопирования.

Как видно из табл. 2, при переходе к строениям с несколькими балками при постоянном расстоянии между ними производная коэффициента подъемной силы и критерий  $A$  возрастают, а коэффициент лобового сопротивления ведет себя немонотонно.

Из данных табл. 2 и 3 следует, что  $\bar{c}_{xa0}$  двухбалочного строения (при  $L_1/H = 2$ ) оказывается в  $1,7 \div 1,9$  раза, а трехбалочного строения (при  $L_1/H = 2,3$ ) в  $1,2 \div 1,6$  раза меньше коэффициента сопротивления одиночной балки, что противоречит рекомендациям [17], именно: при «расстоянии в свету» между балками ( $L_1 - B_0$  в нашем случае) менее  $7H$  предлагается принимать коэффициент сопротивления системы в 1,5 раза большим коэффициента одиночной балки. Отметим, что в нормативных документах [9, 10] многобалочные строения как отдельный класс обтекаемых тел не рассматриваются.

Таким образом, полученные в работе данные по зависимости  $\bar{c}_{xa0}$  от числа  $n$  (или  $B/H$ ) не систематизируются, что говорит о влиянии на коэффициент лобового сопротивления также формы сечения в целом.

Обобщение данных по коэффициенту лобового сопротивления возможно при учете зависимости  $\bar{c}_{xa0}$  как от относительной ширины сечения  $B/H$ , так и от относительного межбалочного расстояния  $L_1/H = 1$ . Для прикидочных оценок можно использовать следующие формулы:

– для гладкого потока

$$\bar{c}_{xa0} = 0,308 + \left( 0,115 - 0,00992 \frac{B}{H} \right) \frac{B}{H} + 0,332 \frac{L_1}{H}, \quad (1)$$

– для турбулентного потока

$$\bar{c}_{xa0} = -0,555 + \left( 0,0981 - 0,00312 \frac{B}{H} \right) \frac{B}{H} + 0,754 \frac{L_1}{H}. \quad (2)$$

Зависимости (1) и (2) справедливы при  $2 \leq B/H \leq 7$ ,  $2 \leq L_1/H \leq 3$ .

Таблица 3

Влияние межбалочного расстояния на аэродинамические характеристики трехбалочной конструкции

$L_1/H = 2$	$B/H$	$\bar{c}_{xa0}$		$\bar{c}_{ya0}^\alpha$		$A$	
		гладк.	турб.	гладк.	турб.	гладк.	турб.
2,3	5,35	1,402	1,793	3,838	1,927	4,466	2,730
3	6,75	1,627	2,511	3,155	-0,534	3,884	0,590

Как следует из табл. 3, разнесение балок трехбалочного пролетного строения на расстояние  $3H$  приводит к заметному росту коэффициента сопротивления, уменьшению производной коэффициента подъемной силы и критерия Ден–Гартога.

### Заключение

Установлено существенное влияние формы поперечного сечения на коэффициент лобового сопротивления многобалочной конструкции, что не учитывается действующими нормативными источниками. Построена обобщенная зависимость коэффициента сопротивления для нулевого угла атаки от относительных ширины сечения и межбалочного расстояния.

Из всех исследованных моделей только для однобалочной конструкции имеется вероятность возникновения галопирования. В аэродинамическом следе моделей формируется устойчивая вихревая дорожка, что указывает на возможность вихревого возбуждения колебаний.

Для трехбалочной конструкции расстояние между балками в три высоты сечения неблагоприятно в аэродинамическом отношении, т. к. в этом случае вследствие интерференции резко увеличивается коэффициент лобового сопротивления.

### Список литературы

1. Саленко С.Д., Кураев А.А., Обуховский А.Д., Акопов В.И., Канунников А.Б. Аэродинамические испытания в процессе надвигки мостов // Транспортное строительство. М., 1996. С. 40–41.
2. В Республике Беларусь рухнул строящийся мост [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://forum.bridgear.ru> (дата обращения: 12.01.2011). Загл. с экрана.
3. Саленко С.Д. Нестационарная аэродинамика плохообтекаемых многобалочных конструкций: дис. ... д-р. техн. наук: 01.02.05; защищена 21.10.05. Новосибирск, 2005. 332 с.
4. Саленко С.Д. Особенности нестационарных аэродинамических характеристик многобалочных конструкций // Науч. вестн. НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. С. 131–142.
5. Саленко С.Д., Обуховский А.Д., Акопов В.И., Канунников А.Б. Аэродинамические испытания Томского моста // Науч. Вестн. НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. С. 143–150.
6. 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. Т. 13, № 1. С. 167–176.
7. Саленко С.Д., Обуховский А.Д., Телкова Ю.В. Пассивные гасители аэроупругих колебаний пролетного строения моста на стадии монтажа // Интернет-вестник ВолГАСУ. Сер.: Политематическая. 2011. Вып. 2 (16). Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru>.
8. Саленко С.Д., Обуховский А.Д., Гостев Ю.А., Телкова Ю.В. Исследование структуры течения в окрестности двух балок квадратного поперечного сечения в условиях интерференции // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 2. С. 313–323.
9. СП 20.13330.2011. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия. (Актуализированная редакция). М.: 2011. 96 с.
10. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General actions. Wind actions. EN 1991-1-4:2005 / European Standard. Brussels, 2005.
11. 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 [Electronic resource]. Electronic data. Mode access: <http://www.kuleuven.be/bwf/projects/annex41/protected/data/Recommendations%20for%20CFD%20in%20wind%20engineering.pdf>.
12. Unhale S.A. Application and analysis of RANS based turbulence models for bluff body aerodynamics: Master's thesis. Texas Tech Univ., 2005. [Electronic resource]. Electronic data. Mode access: <http://hdl.handle.net/2346/1033>.
13. Liaw K. Simulation of flow around bluff bodies and bridge deck sections using CFD: PhD thesis. University of Nottingham, 2005. [Electronic resource]. Electronic data. Mode access: <http://theses.nottingham.ac.uk/125/>.
14. Frandsen B. Computational fluid-structure interaction applied to long-span bridge design: PhD thesis. University of Cambridge, 1999. 81 с.
15. Morgenthal G. Comparison of numerical methods for bridge deck aerodynamics: Mphi thesis; University of Cambridge. 2000. [Electronic resource]. Electronic data. Mode access: <http://www2.eng.cam.ac.uk/~gm249/tr.pdf>.
16. Youngl M.E., Ooi A. Turbulence models and boundary conditions for bluff body flow // 15<sup>th</sup> Australasian Fluid Mech. Conf. The University of Sydney. Sydney, Australia 13-17, December 2004.
17. Design manual for roads and bridges: vol. 1: Approval procedures and general design: Section 3. General design, Part 14: BD 37/01: Loads for Highway Bridges. UK Highways Agency, 2001. 106 с.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2012 г.