

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ



**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ОЦЕНКЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СЕЧЕНИЙ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
(РОСАВТОДОР)**

МОСКВА 2014

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН НГТУ (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»), руководитель разработки д-р техн. наук, профессор С.Д. Саленко, отв. исполнитель к.ф.-м.н., доцент Ю.А. Гостеев, при участии д-ра техн. наук, профессора А.А. Кураева, к.т.н., доцента А.А. Обуховского, к.т.н., доцента В.П. Однорала, к.т.н. Ю.В. Телковой.

При разработке Рекомендаций учтены данные исследований ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко, ФГУП ЦАГИ имени профессора Н.Е. Жуковского.

2 ВНЕСЕН Управлением строительства и проектирования автомобильных дорог.

3 ИЗДАН на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 24. 03. 2014 г. № 478-р.

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ.

5 ИМЕЕТ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР.

© Издательство ФГУП «Информавтодор», 2014

Содержание

1	Область применения	4
2	Нормативные ссылки	4
3	Сокращения	5
4	Общие положения	5
5	Классификация воздействий ветра на сооружения	7
6	Геометрические параметры сечений	9
7	Аэродинамические характеристики сечений пролетных строений мостов	10
8	Порядок оценки аэродинамических характеристик сечений	16
9	Примеры использования аэродинамических характеристик сечений	20
	Приложение А «Сводка аэродинамических характеристик сечений»	23
	Приложение Б «Распределение давления по сечениям»	58
	Приложение В «Числа Струхала сечений»	66
	Приложение Г «Методическое обоснование»	67
	Библиография	84

Методические рекомендации по оценке аэродинамических характеристик сечений пролетных строений мостов

1 Область применения

1.1 Настоящий отраслевой дорожный методический документ (далее – методический документ) содержит рекомендации по оценке аэродинамических характеристик типовых поперечных сечений пролетных строений балочных мостов: коэффициентов лобового сопротивления, подъемной силы и момента (осредненных по времени), критерия галопирования, числа Струхала.

1.2 Положения настоящего методического документа предназначены для применения организациями, выполняющими работы в сфере дорожного хозяйства в области проектирования автомобильных дорог и искусственных сооружений на них (мосты, путепроводы и эстакады) с целью обеспечения механической безопасности при воздействии ветра.

Отраслевой дорожный методический документ «Методические рекомендации по оценке аэродинамических характеристик сечений пролетных строений мостов» является актом рекомендательного характера.

2 Нормативные ссылки

В настоящих Рекомендациях использованы ссылки на следующие документы:

ГОСТ Р 54257-2010. Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования - Введ. 23-12-2010. –М: Стандартинформ, 2011. -18 с.

СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. – М.: Госстрой СССР,

1986. – 32 с. (актуализированная редакция в виде СП 20.13330.2011).

СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы. – М.: ГП ЦПП, 1996. – 214 с. (актуализированная редакция в виде СП 35.13330.2011).

ОДМ 218.1.001-2010 «Рекомендации по разработке и применению документов технического регулирования в сфере дорожного хозяйства»

ОДМ 218.1.002-2010 «Рекомендации по организации проведения работ по стандартизации в дорожном хозяйстве»

3 Сокращения

В настоящем методическом документе применены следующие сокращения:

СНиП: Строительные нормы и правила.

ОКС: Общероссийский классификатор стандартов.

ЦС: Центр сечения.

ЦЖ: Центр жесткости сечения.

4 Общие положения

Строительство современных мостов с длинными пролетами требует особого внимания к ветровым нагрузкам и аэроупругим колебаниям пролетных строений. Примерами могут служить разрушение Такомского моста в 1940 г., колебания пролетного строения в Барнауле в 1993 г., разрушение авангардной части строения на стадии надвигки под Витебском в 2006 г., инцидент с колебаниями пролетного строения моста в Волгограде в 2010 г.

Новая редакция Национального стандарта «Надежность строительных конструкций и оснований», отмечает необходимость учета не только ветровых нагрузок, но и аэроупругих эффектов при взаимодействии ветра с гибкими сооружениями.

Значительно больше внимания уделено ветровым нагрузкам в актуализированных редакциях СНиП «Нагрузки и воздействия» [1] и «Мосты и трубы» [2].

Так, СНиП «Мосты и трубы» устанавливает обязательность проверки на аэродинамическую устойчивость висячих и вантовых мостов, а также стальных балочных мостов с пролетами более 100 м. Но в то же время информации для расчета ветровых нагрузок на пролетные строения мостов в указанных нормативных документах явно недостаточно (в СНиП «Нагрузки и воздействия» аэродинамические коэффициенты для типовых сечений мостов отсутствуют, данные по числу Струхала приведены только для одиночных прямоугольных поперечных сечений; в СНиП «Мосты и трубы» в приложении Н даны значения только коэффициента лобового сопротивления для частей и элементов пролетных строений мостов, причем без учета особенностей формы элементов).

Большое внимание ветровым воздействиям уделяется в зарубежных нормативных документах [3, 4, 5, 6].

Для достоверных расчетов ветровых нагрузок и предотвращения аэроупругих колебаний пролетных строений необходимы данные по аэродинамическим характеристикам как конкретных проектируемых мостов, так и типовых сечений пролетных строений.

В настоящем методическом документе приводятся рекомендации по оценке основных аэродинамических характеристик типовых поперечных сечений пролетных строений балочных мостов – коэффициентов лобового сопротивления, подъемной силы и момента, параметра галопирования. В качестве типовых выбраны поперечные сечения одно- и многобалочных пролетных строений, отражающие обводы реальных длинопролетных балочных мостовых сооружений на стадиях возведения и эксплуатации, а также рекомендованные ведущими мостостроительными организациями. Аэродинамические характеристики приводятся для неподвижных строений при наличии и отсутствии плит перекрытия, ограждений, автотранспортных средств. Для некоторых наиболее практически важных конфигураций приведены

распределение давления по поверхности строения и числа Струхала.

Аэродинамические характеристики были получены как экспериментально при продувке моделей мостов в аэродинамической трубе, так и численными расчетами обтекания поперечных сечений.

5 Классификация воздействий ветра на сооружения

Нагрузки и воздействия, возникающие при взаимодействии ветра со строительными конструкциями, по своей природе можно разделить на два основных типа: воздействия, связанные с непосредственным действием на здания и сооружения максимальных ветров, и воздействия, вызывающие интенсивные аэроупругие колебания [1... 19].

Воздействия первого типа называются ветровой нагрузкой. Согласно СНиП «Нагрузки и воздействия» [1] **ветровая нагрузка** определяется как сумма средней и пульсационной составляющих. При расчете средней составляющей ветровой нагрузки необходимо знать аэродинамические коэффициенты сооружения. При расчете пульсационной составляющей ветровой нагрузки необходимо решать задачу **динамической реакции сооружения** на действие ветра [1, 9, 11, 12, 16]. При воздействии расчетной ветровой нагрузки должны быть обеспечены прочность сооружения, отсутствие **дивергенции** (статической формы потери аэроупругой устойчивости) и выполнено ограничение по предельным прогибам и перемещениям конструкции [11, 21, 22].

К воздействиям второго типа относятся:

- **резонансное вихревое возбуждение колебаний** (ветровой резонанс) – интенсивные колебания сооружения поперек потока в узком диапазоне скоростей ветра, возникающие при совпадении одной из собственных частот колебаний сооружения с частотой схода вихрей дорожки Кармана [7, 8, 11, 13, 23]; для многобалочных пролетных строений, в отличие от одиночных балок, существуют две или три

резонансных скорости ветра, при которых наблюдаются интенсивные колебания сооружения поперек потока [18, 19, 20];

- **галопирование** – одна из форм аэроупругой неустойчивости сооружений; связано с дестабилизирующей способностью подъемной силы; возможно, если параметр галопирования отрицателен (критерий Ден-Гартога); колебания такого типа возникают в плоскости, перпендикулярной направлению потока, при скоростях ветра выше критической, амплитуда колебаний при этом монотонно увеличивается с ростом скорости набегающего потока [7, 8, 11, 23, 24, 25].

- **флаттер** – является одним из наиболее опасных видов неустойчивости пролетных строений; флаттер опасен тем, что может привести к полному разрушению конструкции вследствие неограниченного возрастания амплитуд колебаний. Классический флаттер связан с изгибно-крутильными нарастающими во времени самовозбуждающимися колебаниями, вызванными несовпадением точки приложения аэродинамических сил с центром изгиба поперечного сечения балки жесткости моста [7, 11, 21, 22]. Срывной флаттер, связанный с сильными аэродинамическими нелинейностями, гистерезисом при срыве потока, характеризуется аэроупругими автоколебаниями преимущественно крутильного типа [7, 11, 23].

- **бафтинг** – нерегулярные вынужденные колебания сооружений или их отдельных частей под действием срывных течений, порожденных обтеканием самой конструкции, либо расположенных рядом сооружений; интенсивность бафтинга возрастает, если собственная частота колебаний конструкции совпадает с частотой, соответствующей максимуму на спектре пульсаций скорости, а также если возбудитель сам совершает колебания в потоке [7, 11, 13, 25],

- **колебания, порожденные аэродинамической интерференцией** близкорасположенных сооружений или их частей (специфические формы резонансного вихревого возбуждения многобалочных строений)

[18, 19, 20].

6 Геометрические параметры сечений

Геометрия поперечных сечений задается следующими размерами (рисунок 1): H и B – габаритные высота (без учета ограждений) и ширина сечения; B_{δ} – ширина балки; L_1 – межбалочное расстояние; L_{δ} – длина ребра; δ – длина карниза; H_i и H_o – полная высота и высота щита ограждений.

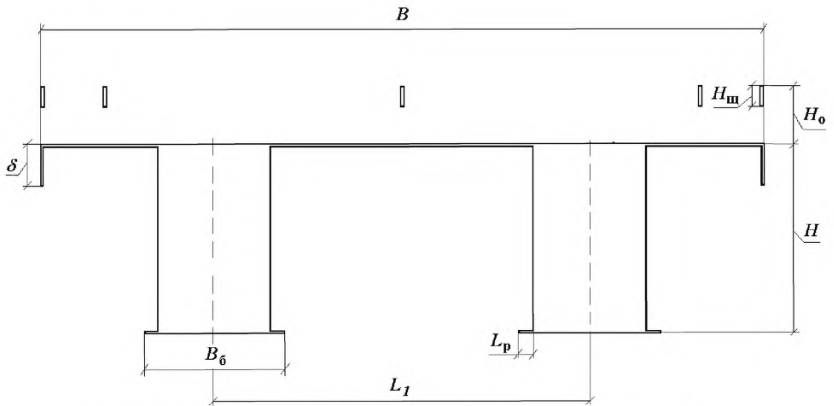


Рисунок 1 – Геометрические параметры типового сечения.

Схема размещения автотранспортных средств на проезжей части приведена на рисунке 2. Здесь H_o – габаритная высота транспортного потока.

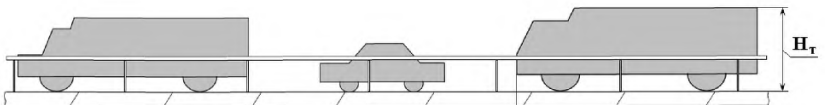


Рисунок 2 – Схема размещения автотранспортных средств на проезжей части.

Определяющими геометрическими параметрами сечения являются относительные размеры: ширина сечения B/H , ширина балки B_a/H , межбалочное расстояние L_1/H , высота ограждений H_1/H , высота автотранспорта H_o/H .

7 Аэродинамические характеристики сечений пролетных строений мостов

В общем случае при действии ветра на сооружение ветровую нагрузку можно представить в виде трех проекций результирующей аэродинамической силы и трех проекций момента на выбранные оси координат.

В случае сечения пролетного строения моста имеем двухмерный случай (результирующая аэродинамическая сила лежит в плоскости, перпендикулярной продольной оси строения) и, соответственно, рассматриваются только две проекции результирующей силы (в скоростной системе координат это сила лобового сопротивления X_a и подъемная сила Y_a , а в связанной системе координат – продольная и нормальная силы X и Y) и продольный момент M (рисунок 3). За точку, относительно которой определяется момент, принимается геометрический центр поперечного сечения (ЦС).

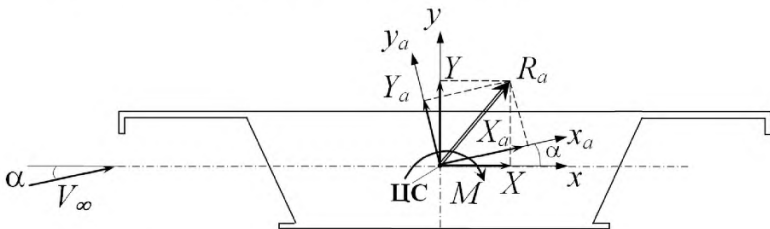


Рисунок 3 – Схема действия аэродинамических сил и момента.

Аэродинамические коэффициенты сечений в данных рекомендациях определяются следующим образом:

коэффициент лобового сопротивления

$$c_{xa} = \frac{X_a}{qS_{\delta\delta}},$$

коэффициент подъемной силы

$$c_{ya} = \frac{Y_a}{qS_{\text{I}\epsilon}},$$

коэффициент момента

$$c_m = \frac{M}{qS_{\text{I}\epsilon}B}.$$

Здесь

$q = \rho V_\infty^2 / 2$, где ρ – плотность воздуха, V_∞ – средняя составляющая скорости ветра на уровне строения, q – скоростной напор, рассчитанный по V_∞ ;

$S_{\delta\delta} = H \cdot l$ – характерная площадь строения при определении c_{xa} (площадь фронтальной проекции строения), $S_{\text{I}\epsilon}$ – характерная площадь строения при определении c_{ya} и c_m (площадь проекции строения в плане: для сечений однобалочных строений и строений с перекрытием $S_{\text{I}\epsilon} = B \cdot l$, для неперекрытых пролетных строений из n балок шириной B_a каждая $S_{\text{I}\epsilon} = n \cdot B_a \cdot l$);

H – высота сечения без учета ограждений и автотранспорта (рисунок 1);

B – габаритная ширина сечения (рисунок 1);

l – длина рассматриваемого участка пролета.

Аэродинамические производные сечений $\partial c_{ya} / \partial \alpha \equiv c_{ya}^\alpha$ и $\partial c_m / \partial \alpha \equiv c_m^\alpha$ рассчитываются по зависимостям коэффициентов \tilde{n}_{ya} и \tilde{n}_{ya} от угла атаки α при $\alpha = 0$.

Параметр галопирования A (factor of galloping instability [3]) определяется формулой

$$A = \left(c_{\alpha\alpha} \cdot S_{\delta\delta} / S_{\Gamma\Gamma} + c_{\gamma\alpha}^\alpha \right) \Big|_{\alpha=0}.$$

Параметр A используется для оценки возможности возбуждения галопирующих колебаний по критерию Ден-Гартога ($A < 0$).

Для представления избыточного статического давления Δp на поверхности пролетного строения используется безразмерный коэффициент давления c_p :

$$c_p = \frac{\Delta p}{q} = \frac{p - p_\infty}{q},$$

где p_∞ – статическое давление набегающего потока.


Число Струхала сечения:

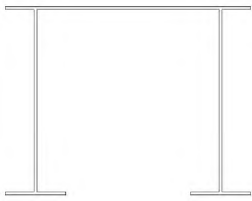
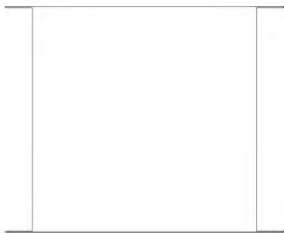
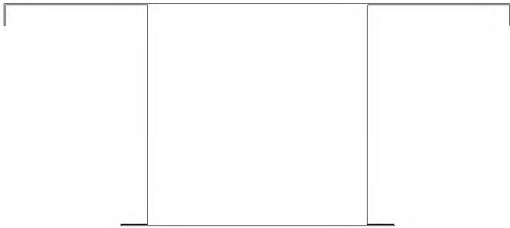
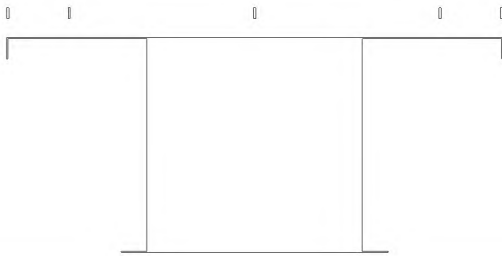
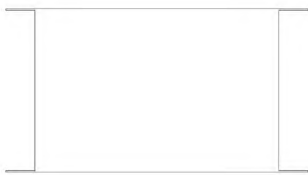
$$Sh = \frac{f_a H}{V_\infty},$$





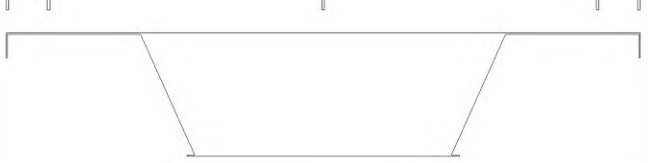

где f_a – частота схода вихрей.


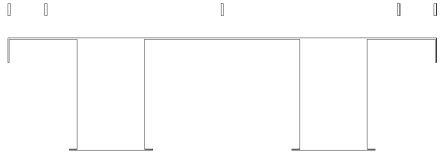
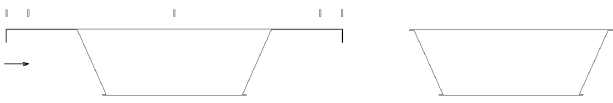
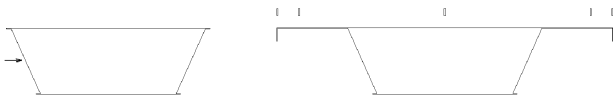

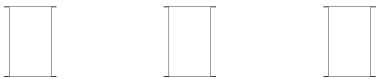
Описание типовых сечений пролетных строений мостов и ссылки на диаграммы их аэродинамических характеристик из Приложения А приведены в таблице 1.


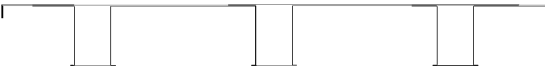
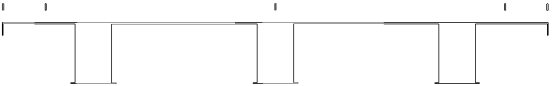



Таблица 1 – Типовые поперечные сечения и их геометрические параметры.

Форма сечения	Относительные размеры	Диаграмма Приложения А
Однобалочные строения		
	$B / H = 0.75$ $B_a / H = 0.75$ $L_\delta / H = 0.0727$	1-1

	$B / H = 1.3$ $B_a / H = 1.3$ $L_{\delta} / H = 0.152$	2-1
	$B / H = 1.24$ $B_a / H = 1.24$ $L_{\delta} / H = 0.121$	3-1
	$B / H = 2.3$ $B_a / H = 1.24$ $L_{\delta} / H = 0.121$ $\delta / H = 0.1$	3-2
	$B / H = 2.3$ $B_a / H = 1.24$ $L_{\delta} / H = 0.121$ $\delta / H = 0.1$ $H_i / H = 0.142$	3-3, 3-4
	$B / H = 1.85$ $B_a / H = 1.85$ $L_{\delta} / H = 0.179$	4-1

	$B / H = 3.9$ $B_a / H = 1.85$ $L_\delta / H = 0.179$ $\delta / H = 0.193$	4-2
	$B / H = 3.9$ $B_a / H = 1.85$ $L_\delta / H = 0.179$ $\delta / H = 0.193$ $H_i / H = 0.275$	4-3, 4-4
	$B / H = 3.09$ $L_\delta / H = 0.0678$	5-1
	$B / H = 5.1$ $L_\delta / H = 0.0678$ $\delta / H = 0.205$	5-2
	$B / H = 5.1$ $L_\delta / H = 0.0678$ $\delta / H = 0.205$ $H_i / H = 0.293$	5-3, 5-4
Двухбалочные строения		
	$B / H = 2.75$ $L_\gamma / H = 2$ $B_a / H = 0.75$ $L_\delta / H = 0.0727$	1-2

	$B / H = 3.85$ $L_1 / H = 2$ $B_a / H = 0.75$ $L_0 / H = 0.0727$ $\delta / H = 0.220$	1-3
	$B / H = 3.85$ $L_1 / H = 2$ $B_a / H = 0.75$ $L_0 / H = 0.0727$ $\delta / H = 0.220$ $H_i / H = 0.314$	1-4, 1-5
	$B / H = 9.2,$ $L_1 / H = 5.1$ $L_0 / H = 0.0678$ $\delta / H = 0.205$ $H_i / H = 0.293$	5-5, 5-6
	$B / H = 9.2,$ $L_1 / H = 5.1$ $L_0 / H = 0.0678$ $\delta / H = 0.205$ $H_i / H = 0.293$	5-7, 5-8
	$B / H = 10.2,$ $L_1 / H = 5.1$ $L_0 / H = 0.0678$ $\delta / H = 0.205$ $H_i / H = 0.293$	5-9, 5-10
<p>Трехбалочные строения</p> $B_a / H = 0.75, L_0 / H = 0.0727$		
	$B / H = 5.35$ $L_1 / H = 2.3$	1-6

	$B/H = 6.75$ $L_1/H = 3$	1-7
	$B/H = 9$ $L_1/H = 3$ $\delta/H = 0.220$	1-8
	$B/H = 9$ $L_1/H = 3$ $\delta/H = 0.220$ $H_i/H = 0.314$	1-9, 1-10
<p align="center">Четырехбалочные строения $B_a/H = 0.75, L_1/H = 2, L_\delta/H = 0.0727$</p>		
	$B/H = 6.75$	1-11
	$B/H = 9$ $\delta/H = 0.220$	1-12
	$B/H = 9$ $\delta/H = 0.220$ $H_i/H = 0.314$	1-13, 1-14

Распределения по поверхности строения статического давления для сечений, проявивших в эксплуатации подверженность аэроупругим колебаниям, приведены в Приложении Б. Числа Струхала для тех же сечений представлены в Приложении В.

8 Порядок оценки аэродинамических характеристик сечений

8.1 Определяются основные характерные размеры рассматриваемого участка пролетного строения (высота сечения H , ширина сечения B , длина участка l) и площади (фронтальная $S_{\delta\delta}$, плановая $S_{\text{те}}$). Как правило, на стадии эксплуатации сечения по длине

пролетного строения одинаковы, а на стадии монтажа, напротив, могут отличаться (в качестве примера можно привести авангардную часть со снятыми ортотропными плитами перекрытия).

8.2 В Приложении А выбирается сечение, наиболее близкое по конфигурации к заданному. Из таблицы аэродинамических характеристик и по графикам берутся значения коэффициентов аэродинамических сил и моментов, а также их производных. Рекомендуется из аэродинамических характеристик для ламинарного и турбулентного потоков выбирать те, которые создают более критичные условия нагружения. Для поперечных сечений, близких по форме к типовым, коэффициент лобового сопротивления при нулевом угле атаки определяется в зависимости от параметров B/H и L_1/H (диаграмма 6.1).

8.3 При расчете ветровых нагрузок, действующих на сооружение, при углах атаки, отличных от нуля, (в случае учета рельефа местности, установки сечения под некоторым углом и т.д.), может возникнуть необходимость пересчета аэродинамических характеристик из скоростной системы координат в связанную. Переход от коэффициентов лобового сопротивления (c_{xa}) и подъемной силы (c_{ya}) к коэффициентам нормальной (c_x) и продольной (c_y) сил с учетом указанных выше замечаний о характерных площадях осуществляется по следующим формулам:

$$c_x = c_{xa} \cos \alpha - c_{ya} \frac{S_{\text{те}}}{S_{\text{об}}} \sin \alpha; \quad c_y = c_{ya} \cos \alpha + c_{xa} \frac{S_{\text{об}}}{S_{\text{те}}} \sin \alpha.$$

Здесь α – угол атаки, то есть угол в вертикальной плоскости между направлением ветра и продольной осью сечения Ox (рисунок 3). В частном случае, при $\alpha = 0$, связанная и скоростная системы координат совпадают, при этом $c_x = c_{xa}$, $c_y = c_{ya}$.

8.4 Пересчитывается коэффициент аэродинамического момента относительно истинного центра жесткости (ЦЖ) сечения, учитывая, что изначально аэродинамические нагрузки (X, Y, M) приведены к некоторому условному центру сечения (ЦС). При расчете руководствоваться схемой, представленной на рисунке 4.

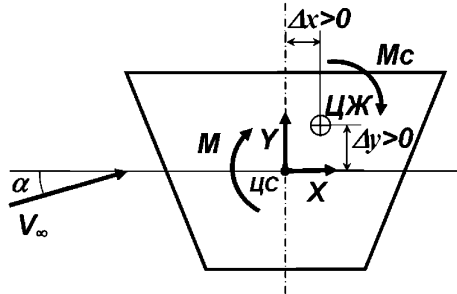


Рисунок 4 – Схема приложения аэродинамических нагрузок в сечении балки пролетного строения.

Момент M_c аэродинамических сил относительно ЦЖ определяется в виде:

$$M_c = M + Y\Delta x - X\Delta y.$$

Обезразмеривая это выражение и учитывая, что в качестве характерной площади для коэффициента продольной силы \tilde{n}_x принимается площадь фронтальной проекции ($S_{\delta\delta}$), а для коэффициентов нормальной силы c_y и момента c_m – площадь в плане ($S_{\text{тв}}$), окончательно получим коэффициент аэродинамического момента относительно ЦЖ сечения:

$$c_{mc} = c_m + c_y \frac{\Delta x}{B} - c_x \frac{\Delta y}{B} \frac{S_{\delta\delta}}{S_{\text{тв}}}.$$

Координаты $(\Delta x, \Delta y)$ ЦЖ относительно центра сечения необходимо брать со своими знаками в соответствии с рисунком 4.

8.5 Для многобалочных конструкций приложение аэродинамических сил и моментов в некоторый центр сечения дает очень приближенное представление о характере нагружения. Чтобы получить более детальную картину, следует воспользоваться эпюрами распределения коэффициентов давления по сечениям (Приложение Б).

8.6 При определении аэродинамических характеристик конструкций, обтекаемых ветровым потоком в условиях интерференции, для наветренного сооружения в первом приближении следует брать те же значения, что и для изолированного, а для подветренного – в соответствии с диаграммами.

8.7 Для определения числа Струхала поперечного сечения необходимо использовать Приложение В.

8.8 Представленные коэффициенты аэродинамических сил, моментов и их производные могут применяться для расчетов ветровых нагрузок по известным методикам, а также для оценки возможности возникновения опасных аэроупругих явлений – дивергенции, резонансного вихревого возбуждения, галопирования, флаттера, бафтинга.

8.9 Следует отметить, что использование характеристик, приведенных в настоящем ОДМ, может давать весьма приближенную оценку ветрового воздействия на сооружение в случае даже незначительного отличия его геометрических параметров от приведенных на диаграммах. Для получения более точной и детализированной информации по этой проблеме необходимо проводить экспериментальные исследования на моделях в аэродинамических трубах при моделировании параметров ветра в месте предполагаемого размещения сооружения в сочетании с расчетным моделированием с помощью программных комплексов вычислительной гидроаэродинамики.

9. Примеры использования аэродинамических характеристик сечений

9.1. Для оценки нагрузок и воздействий, возникающих при взаимодействии ветра с пролетными строениями мостов, кроме геометрических и аэродинамических характеристик поперечных сечений необходимо знать массово-жесткостные характеристики пролетного строения, собственные формы и частоты колебаний конструкции.

9.2. Расчет критической скорости дивергенции $V_{кр1}$ может проводиться по формуле [3, 11]:

$$V_{кр1} = \sqrt{\frac{2k_{\alpha}}{\rho B^2 c_{m0}^{\alpha}}}.$$

Здесь

k_{α} – крутильная жесткость сечения;

c_{m0}^{α} – коэффициент аэродинамического момента сечения относительно геометрического центра сечения при нулевом угле атаки (берется из диаграмм Приложения А);

B – ширина поперечного сечения;

ρ – плотность воздуха.

При $V_{кр1} > 2 V_m$ опасность возникновения дивергенции отсутствует [3]. Здесь V_m – средняя составляющая скорости ветра на уровне строения при десятиминутном осреднении.

9.3. Для расчета критической скорости ветра $V_{кр2}$ при вихревом возбуждении колебаний сооружения поперек потока используется формула:

$$V_{кр2} = \frac{Hf}{Sh}.$$

Здесь

f – частота собственных колебаний конструкции по i -й форме;

Sh – число Струхала сечения (берется из Приложения В, либо по [1, 3, 10, 11]);

H – характерная высота поперечного сечения.

Для примера, оценим возможность возникновения вихревого возбуждения колебаний для трехбалочного пролетного строения (см. схему диаграммы 1-7 Приложения А), совпадающего по форме с авангардной частью строения моста в г. Барнауле на стадии монтажа. Согласно Приложению В число Струхала сечения $Sh = 0.084 \dots 0.089$. Собственная частота колебаний конструкции по первой форме $f = 0.38$ Гц при длине консоли 80 м, поперечный размер сооружения $H = 3.2$ м. Тогда критическая скорость ветра составит $V_{кр2} = 13 \dots 14$ м/с, что соответствует скорости ветра при колебаниях консоли строения с размахом около 1 м во время надвигки в пролет 1-2 в 1993 г.

При $V_{кр2} > 1.25 V_m$ опасность возникновения вихревого возбуждения колебаний отсутствует [3].

Амплитуду a_{\max} (м) установившихся колебаний сооружения поперек потока при вихревом возбуждении колебаний можно определить по формуле [20] (сходная формула приводится также в [3]):

$$a_{\max} = \frac{\rho V_{\infty}^2}{2} \frac{B}{4\pi\delta f^2} \frac{\int_0^l c_a(\bar{a}) R(z, \bar{a}) |\varphi(z)| dz}{\sum_j \int_{l_j} m(z) \varphi^2(z) dz + \sum_i m_i \varphi_i^2}.$$

Здесь

δ – логарифмический декремент колебаний;

z – координата вдоль рассматриваемого участка пролетного строения,

$0 \leq z \leq l$;

$\bar{a} = \bar{a}(z)$ – местная, отнесенная к H , амплитуда колебаний;

$c_a(\bar{a})$ – функция местной амплитуды, пропорциональная коэффициенту пульсационной составляющей подъемной силы, в первом приближении можно принять постоянной, $c_a = 0.2 \dots 1,2$ в зависимости от формы сечения;

$R(z, \bar{a})$ – коэффициент, учитывающий корреляцию пульсаций подъемной силы по длине строения [20]:

$$R(z, \bar{a}) = 1 + \exp(-15\bar{a}^2) \left\{ \exp(-[z/(5H)]^2) - 1 \right\};$$

$\varphi(z)$ – собственная форма колебаний;

$m(z)$ – погонная масса конструкции;

j и l_j – номер и длина участка между узлами собственной формы колебаний;

m_i – массы сосредоточенных грузов;

φ_i – нормированный прогиб в месте i -й сосредоточенной массы.

9.4. Для пролетных строений, формы поперечных сечений которых обуславливают их склонность к галопированию (параметр $A < 0$ [11]) оценивается критическая скорость галопирования $V_{кр3}$ по формуле [7, 11, 24]:

$$V_{кр3} = -\frac{4m\delta f}{\rho H A}$$

Здесь

$A < 0$ – параметр галопирования (берется из диаграмм Приложения А).

При $V_{кр3} > 1.25 V_m$ опасность возникновения галопирования отсутствует [3].

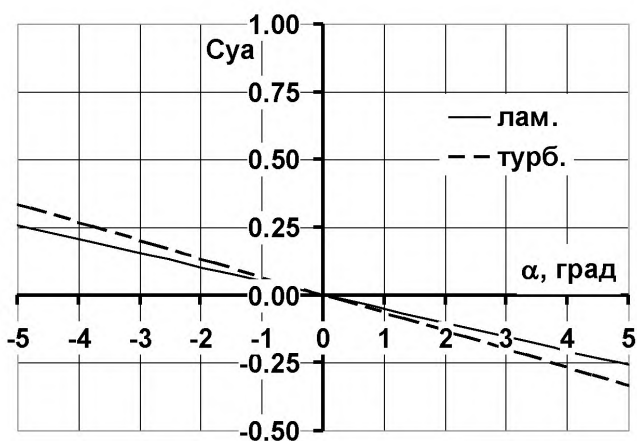
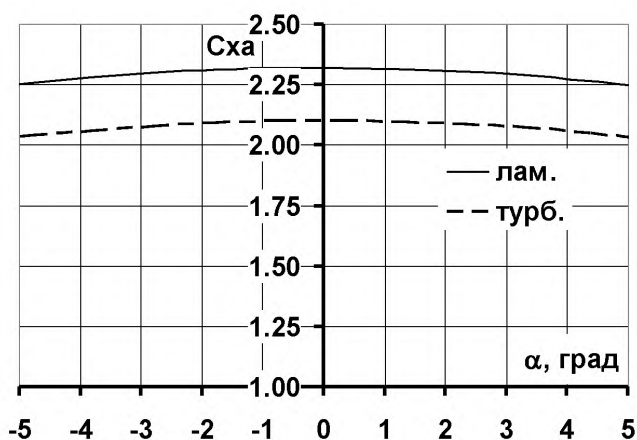
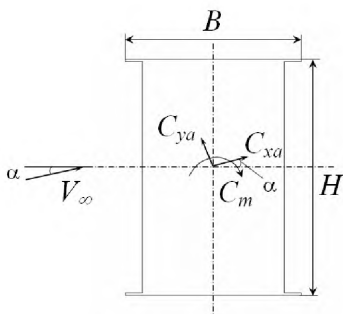
9.5 Сложность и многообразие аэромеханических явлений, сопровождающих флаттер, бафтинг и интерференцию делает рассмотрение соответствующих примеров в общем случае затруднительным. В частных случаях необходимы специальные аэродинамические исследования для конкретных конструкций.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
СВОДКА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЙ

Приведены итоговые данные по аэродинамическим характеристикам типовых поперечных сечений пролетных строений мостов, рекомендуемые для практического использования.

Балка прямоугольного сечения
($B/H = B_a/H = 0.75$)

Диаграмма 1-1

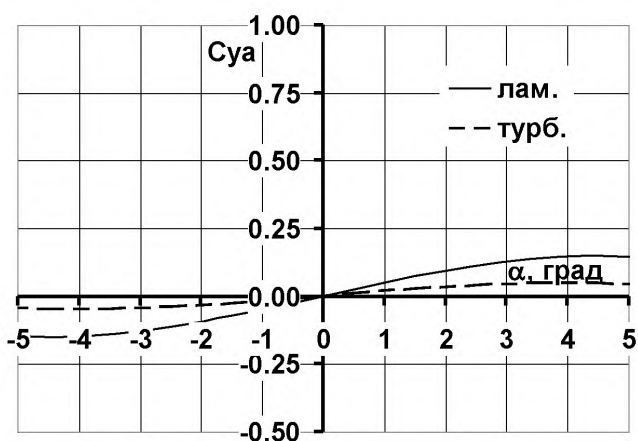
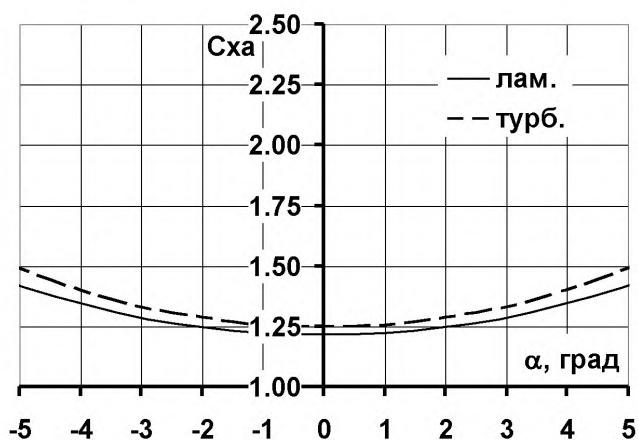
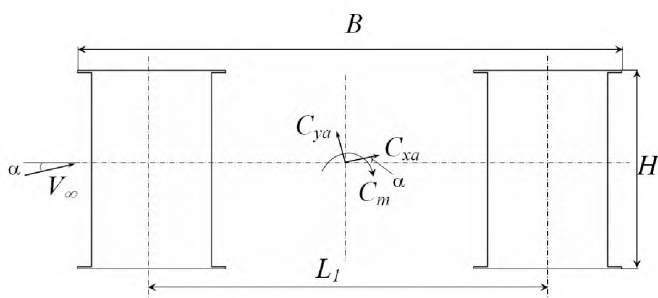


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	2.32	0.00	0.00	-2.96	-0.57	0.14
турб.	2.10	0.00	0.00	-3.83	-4.58	-1.03

Две балки прямоугольного сечения
($B/H = 2.75$, $B_a/H = 0.75$, $L_1/H = 2$)

Диаграмма 1-2

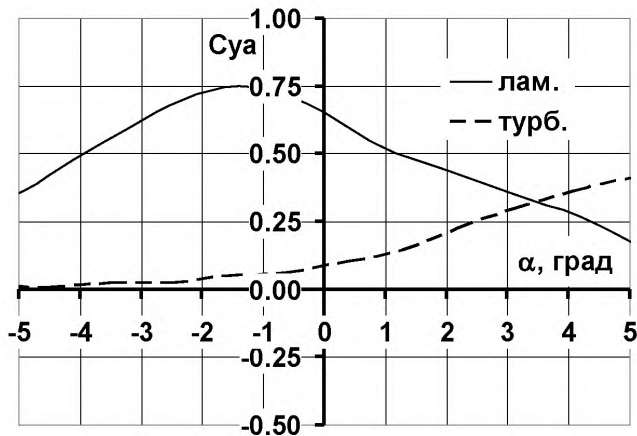
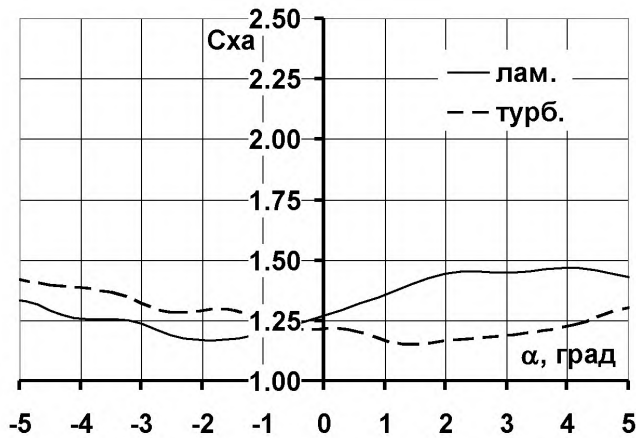
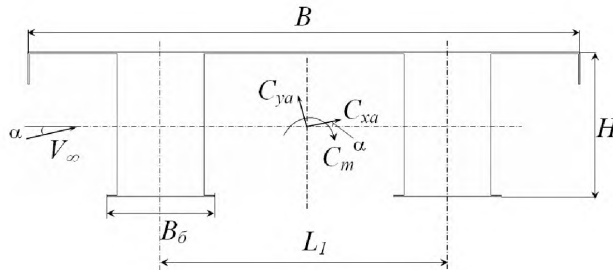


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.21	0.00	0.00	2.85	-2.17	3.67
турб.	1.25	0.00	0.00	1.07	-3.10	1.91

Две балки прямоугольного сечения с перекрытием
($B/H = 3.85$, $B_a/H = 0.75$, $L_1/H = 2$)

Диаграмма 1-3

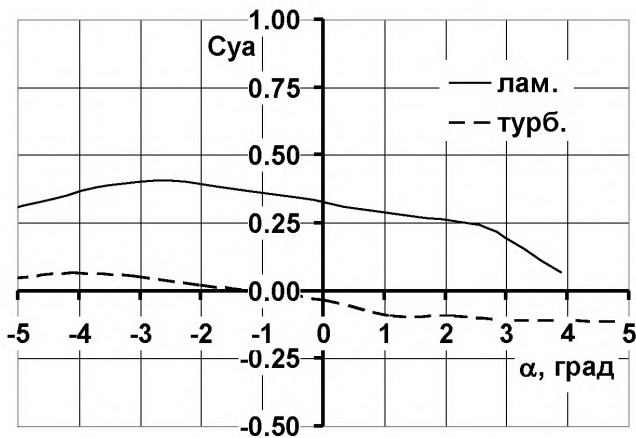
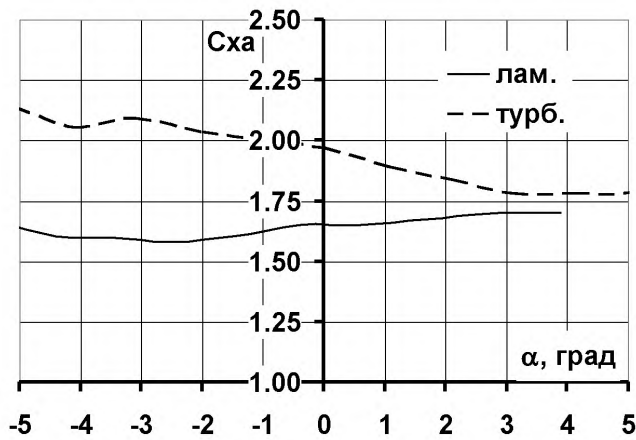
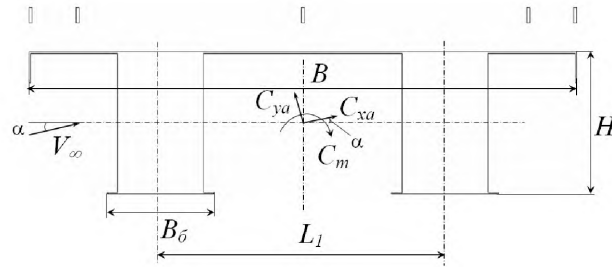


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	$C_{x\alpha 0}$	$C_{y\alpha 0}$	C_{m0}	$C_{y\alpha 0}^\alpha$	C_{m0}^α	A
лам.	1.27	0.65	0.12	-5.34	-1.00	-5.01
турб.	1.21	0.09	0.17	2.27	-0.25	2.59

Две балки прямоугольного сечения
с перекрытием и ограждениями
($B/H=3.85$, $B_a/H=0.75$, $L_1/H=2$, $H_1/H=0.314$)

Диаграмма 1-4

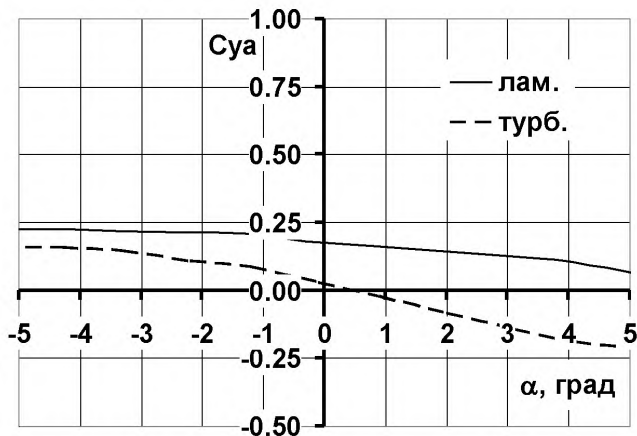
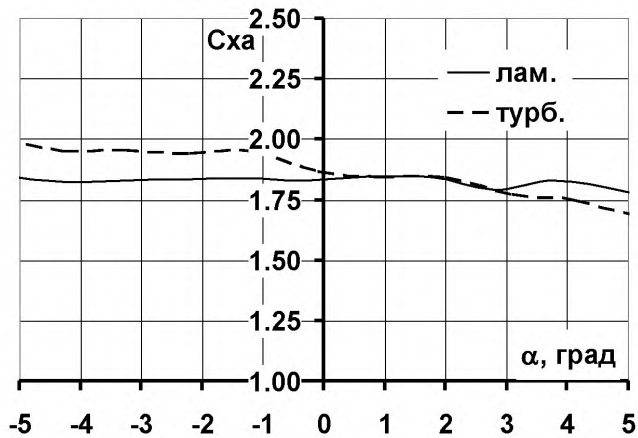
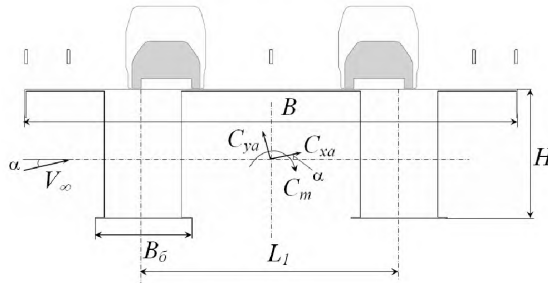


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.64	0.32	0.15	-2.25	-0.62	-1.82
турб.	1.96	-0.05	0.26	-2.00	0.04	-1.49

Две балки прямоугольного сечения с перекрытием,
ограждениями и автотранспортом
($B/H=3.85$, $B_a/H=0.75$, $L_1/H=2$, $H_i/H=0.314$, $H_o/H=1.167$)

Диаграмма 1-5

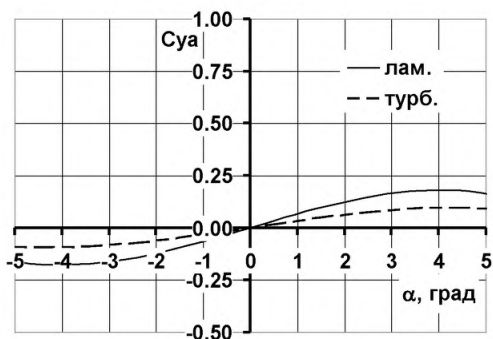
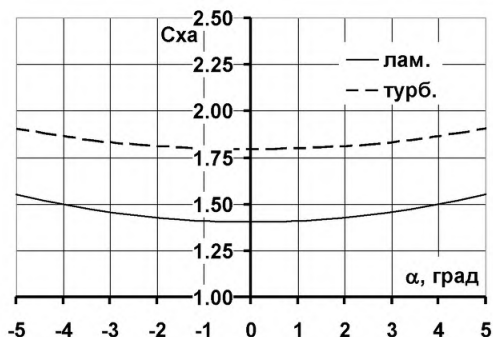
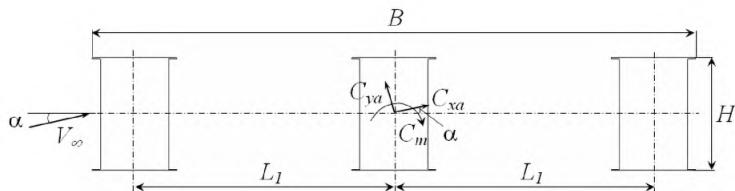


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.84	0.18	0.09	-1.06	-0.07	-0.58
турб.	1.88	0.03	0.13	-2.86	-0.08	-2.37

Три балки прямоугольного сечения
($B/H=5.35$, $B_a/H=0.75$, $L_1/H=2.3$)

Диаграмма 1-6

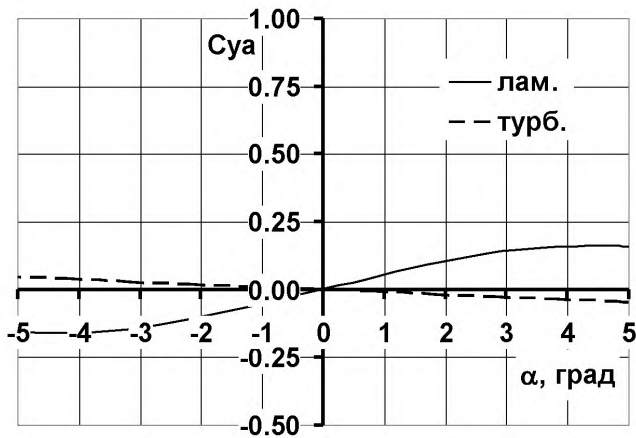
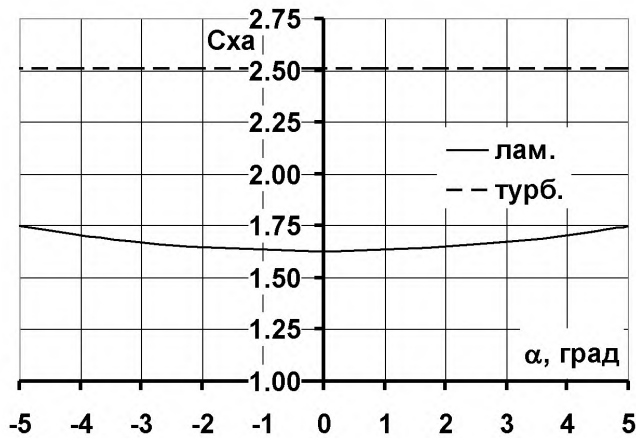
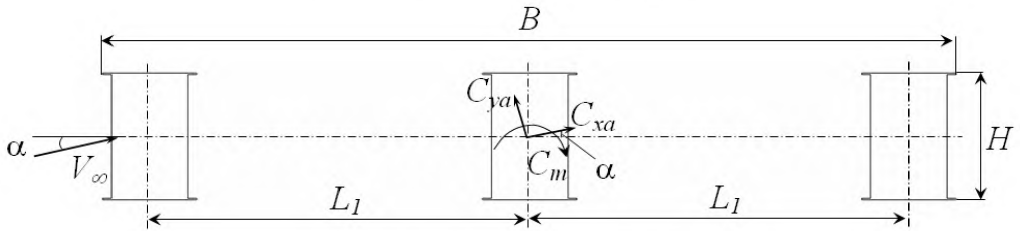


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.40	0	0	3.84	-0.95	4.46
турб.	1.79	0	0	1.93	-0.27	2.73

Три балки прямоугольного сечения
($B/H = 6.75$, $B_a/H = 0.75$, $L_1/H = 3$)

Диаграмма 1-7

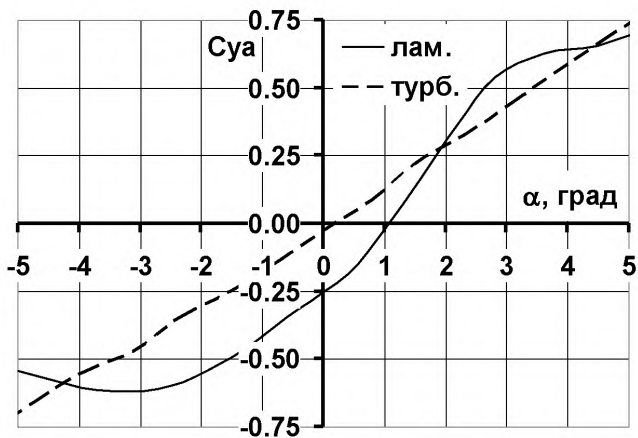
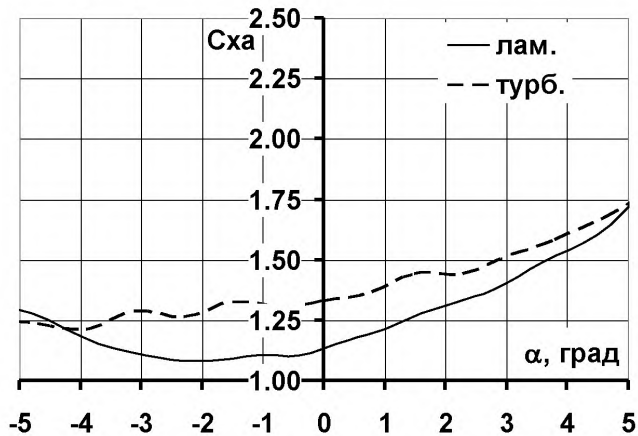
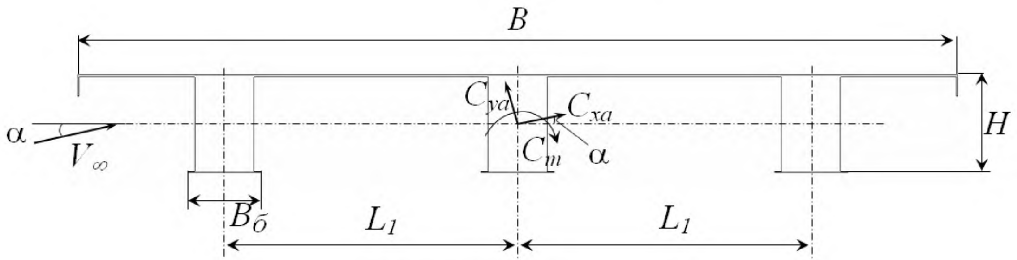


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.63	0	0	3.15	-2.02	3.88
турб.	2.51	0	0	-0.53	0.00	0.59

Три балки прямоугольного сечения с перекрытием
($B/H=9$, $B_a/H=0.75$, $L_1/H=3$)

Диаграмма 1-8

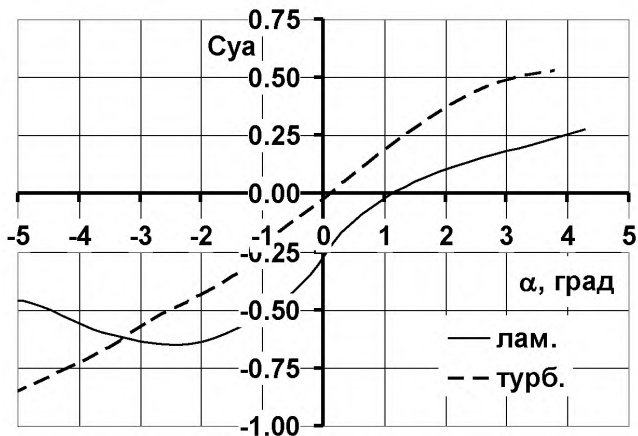
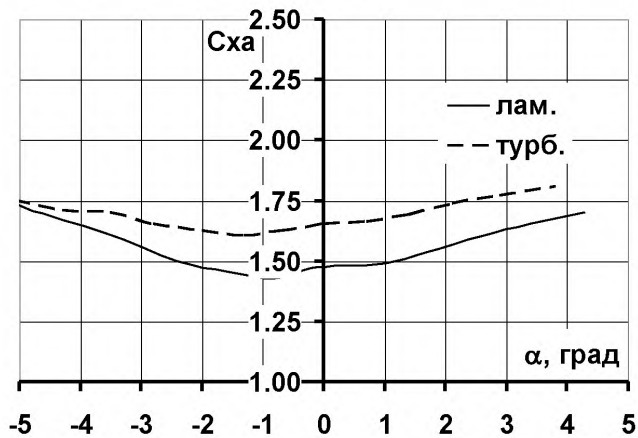
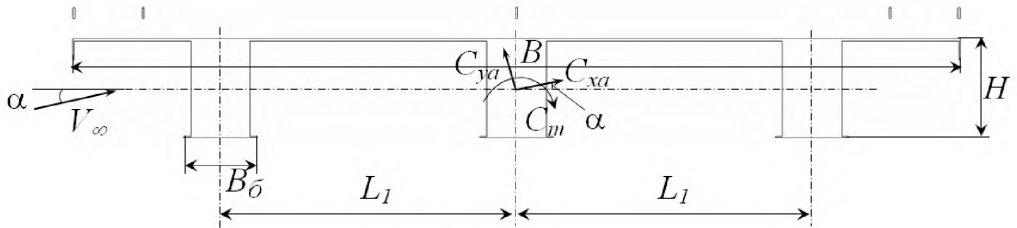


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.14	-0.24	0.15	13.3	2.34	13.4
турб.	1.34	-0.03	0.11	8.70	1.58	8.85

Три балки прямоугольного сечения
с перекрытием и ограждениями
($B/H=9$, $B_a/H=0.75$, $L_1/H=3$, $H_1/H=0.314$)

Диаграмма 1-9

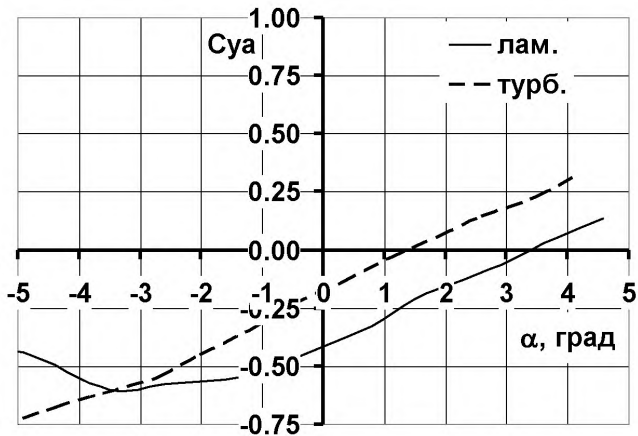
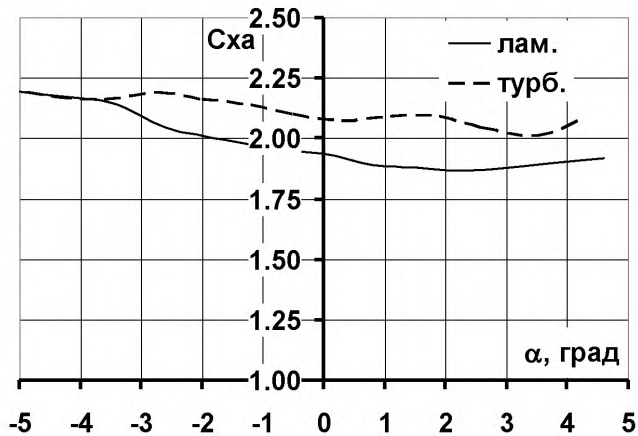
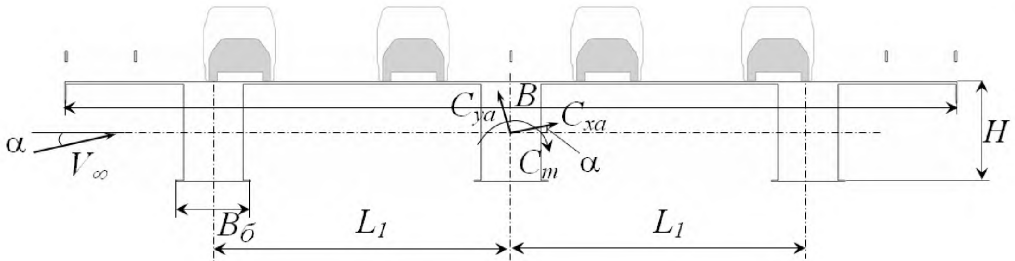


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.46	-0.27	0.08	14.0	3.26	14.2
турб.	1.64	-0.03	0.09	12.5	2.73	12.7

Три балки прямоугольного сечения с перекрытием,
ограждениями и автотранспортом
($B/H=9$, $B_a/H=0.75$, $L_1/H=3$, $H_i/H=0.314$, $H_o/H=1.167$)

Диаграмма 1-10

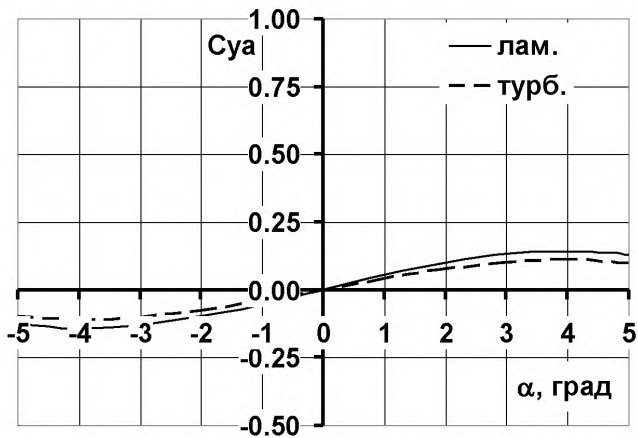
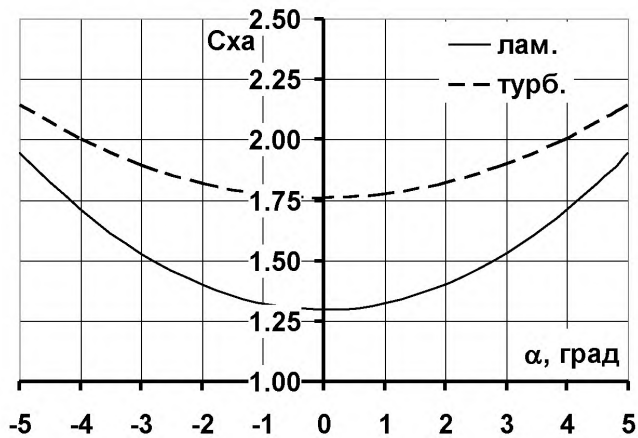
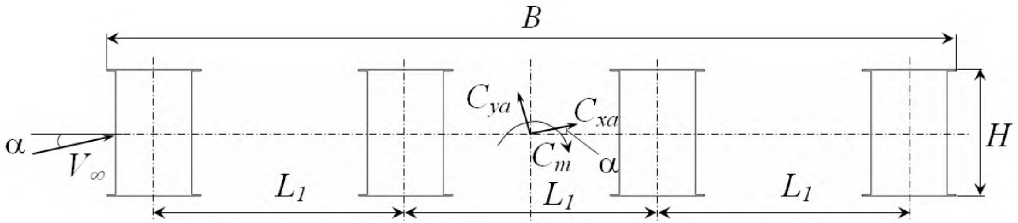


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{xa0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.92	-0.42	-0.03	7.10	2.11	7.32
турб.	2.11	-0.18	0.00	8.02	2.23	8.25

Четыре балки прямоугольного сечения
($B/H = 6.75$, $B_a/H = 0.75$, $L_1/H = 2$)

Диаграмма 1-11

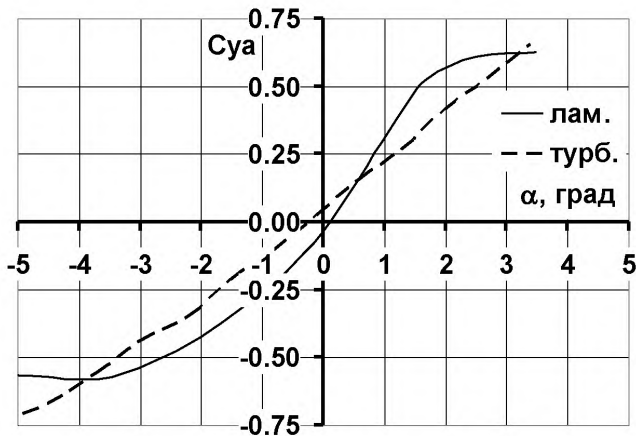
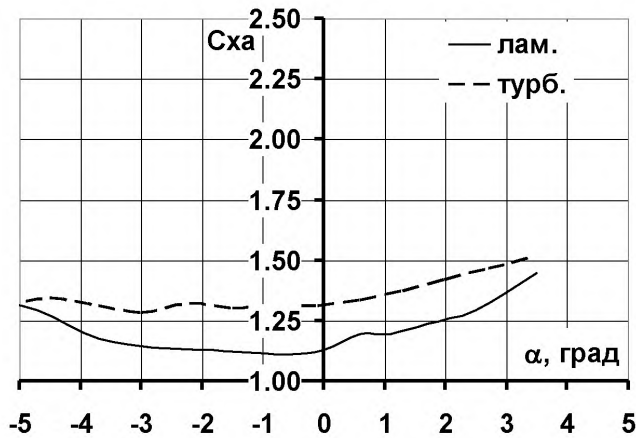
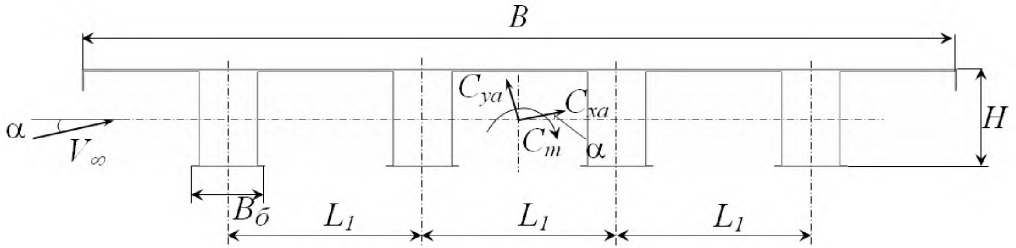


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.29	0	0	3.11	-1.49	3.54
турб.	1.76	0	0	2.39	-1.63	2.98

Четыре балки прямоугольного сечения с
перекрытием
($B/H = 9$, $B_0/H = 0.75$, $L_1/H = 2$)

Диаграмма 1-12

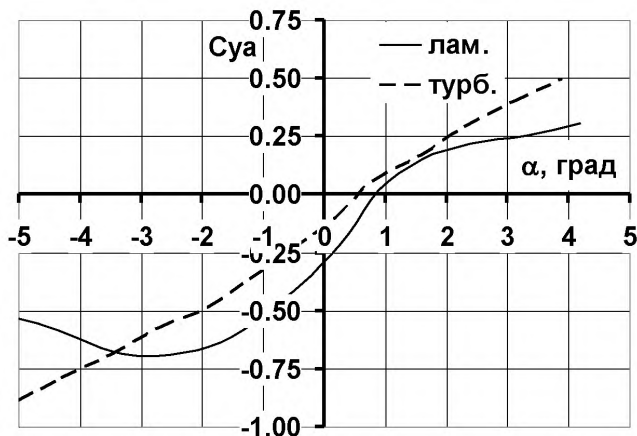
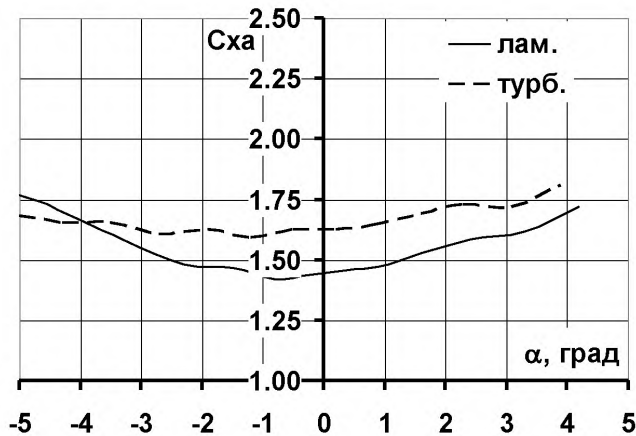
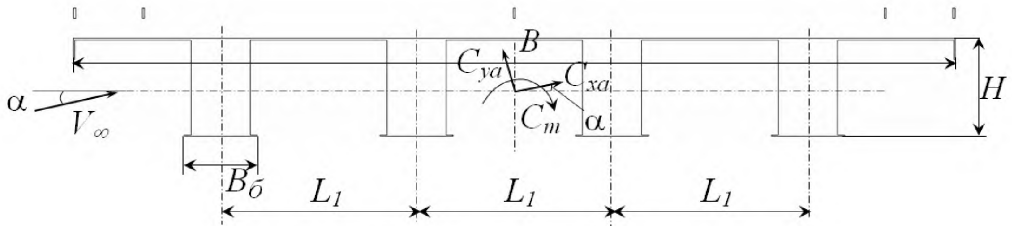


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.14	-0.01	0.13	16.3	3.29	16.4
турб.	1.32	0.04	0.12	10.1	3.13	10.3

Четыре балки прямоугольного сечения с
перекрытием и ограждениями
($B/H=9$, $B_0/H=0.75$, $L_1/H=2$, $H_1/H=0.314$)

Диаграмма 1-13

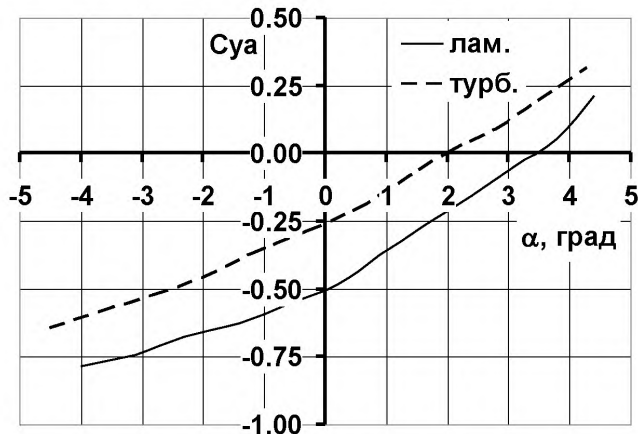
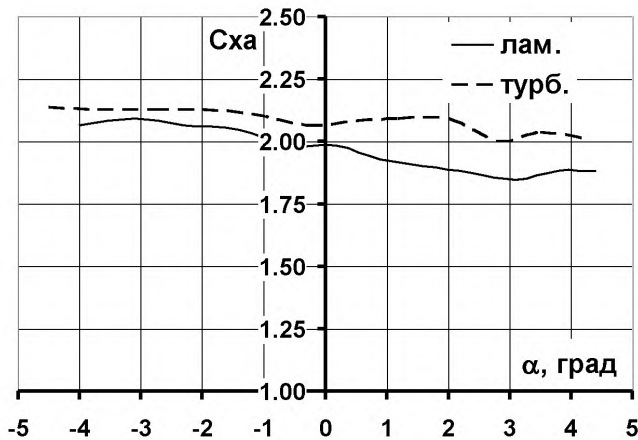
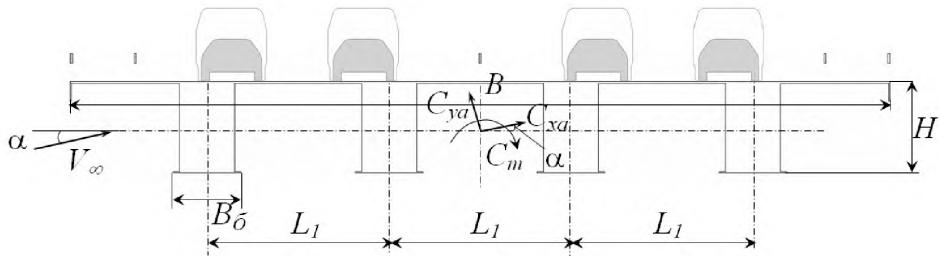


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.44	-0.26	0.05	15.2	2.63	15.4
турб.	1.63	-0.13	0.07	11.5	2.62	11.6

Четыре балки прямоугольного сечения с перекрытием,
ограждениями и автотранспортом
($B/H=9$, $B_a/H=0.75$, $L_1/H=2$, $H_i/H=0.314$, $H_o/H=1.167$)

Диаграмма 1-14

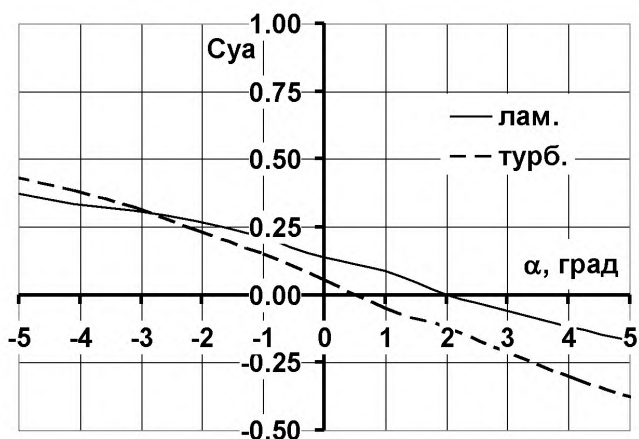
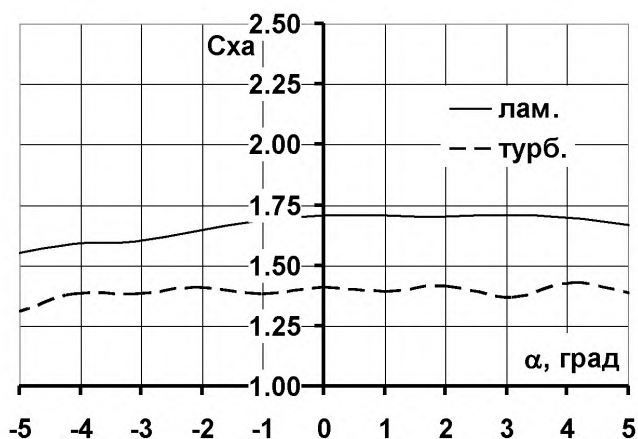
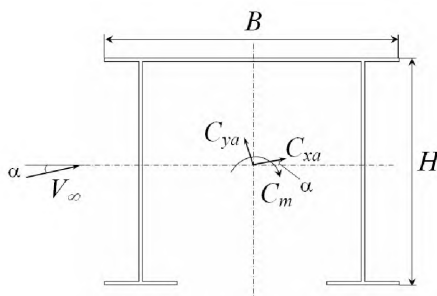


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.97	-0.49	-0.07	6.99	2.07	7.21
турб.	2.09	-0.26	-0.02	6.45	0.77	6.68

Балка П-образного сечения
($B/H = B_a/H = 1.3$)

Диаграмма 2-1

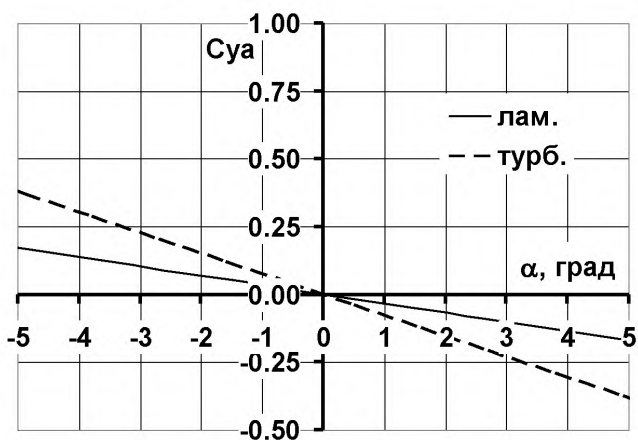
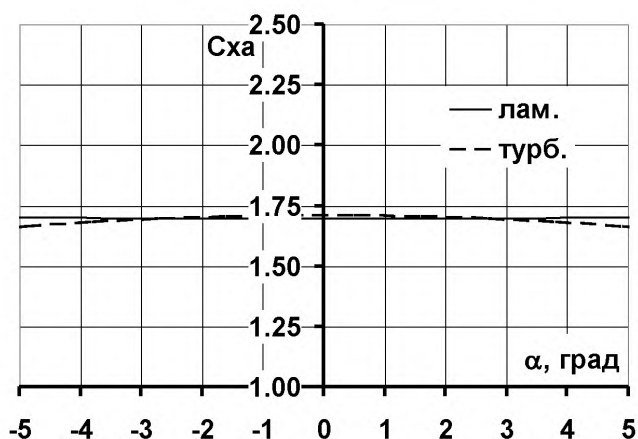
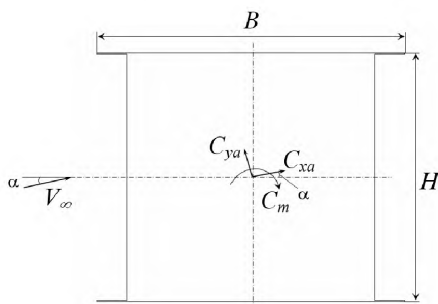


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.70	0.15	0.51	-3.95	0.55	-2.65
турб.	1.39	0.05	0.26	-5.27	1.83	-4.20

Балка прямоугольного сечения
($B/H = B_a/H = 1.24$)

Диаграмма 3-1

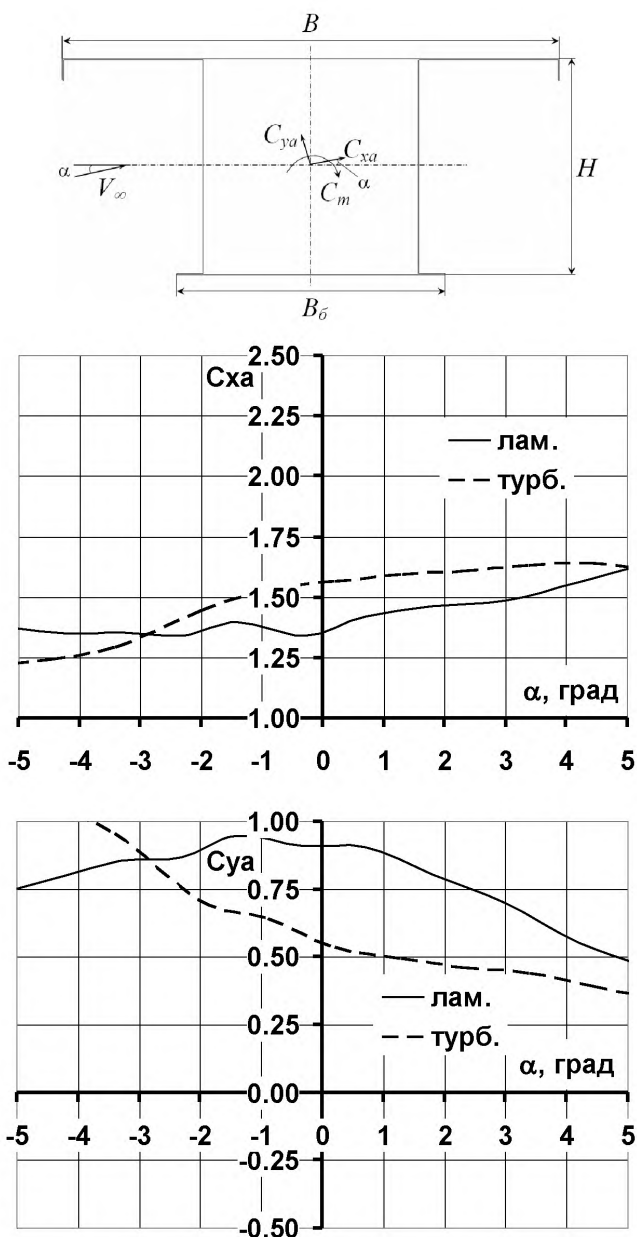


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.70	0	0	-1.95	1.15	-0.58
турб.	1.71	0	0	-4.37	0.93	-2.99

Балка прямоугольного сечения с перекрытием
($B/H = 2.3$, $B_a/H = 1.24$)

Диаграмма 3-2

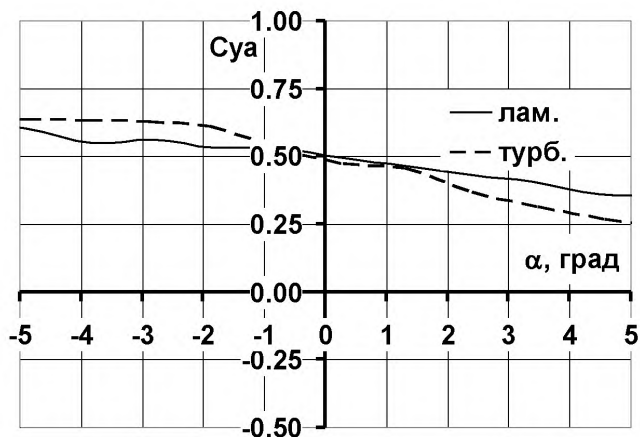
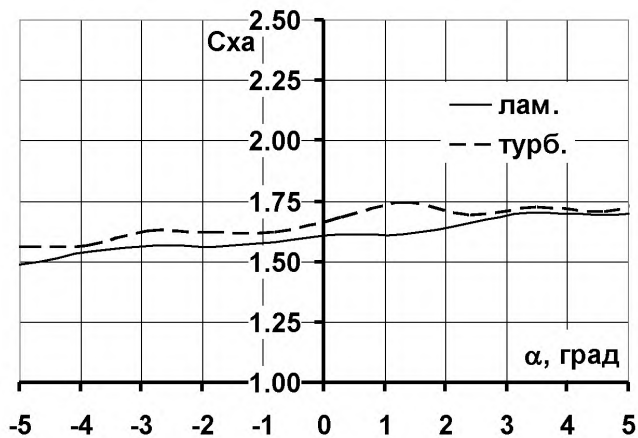
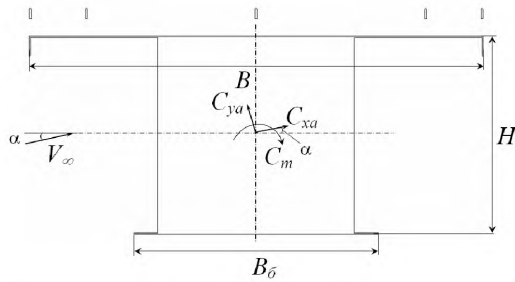


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.39	0.917	0.20	-1.39	1.04	-0.78
турб.	1.56	0.55	0.14	-3.31	-0.09	-2.63

Балка прямоугольного сечения с перекрытием и
ограждениями
($B/H=2.3$, $B_d/H=1.24$, $H_i/H=0.142$)

Диаграмма 3-3

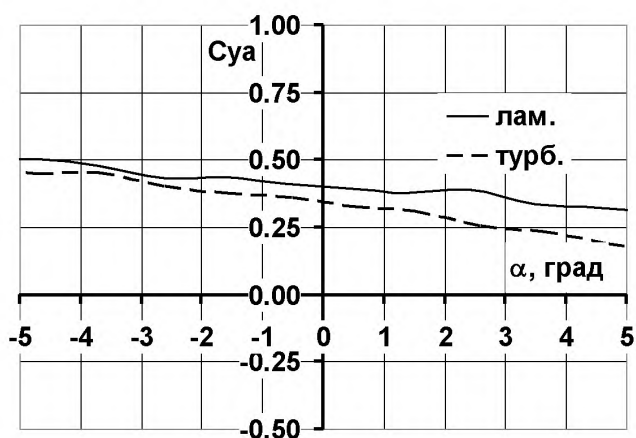
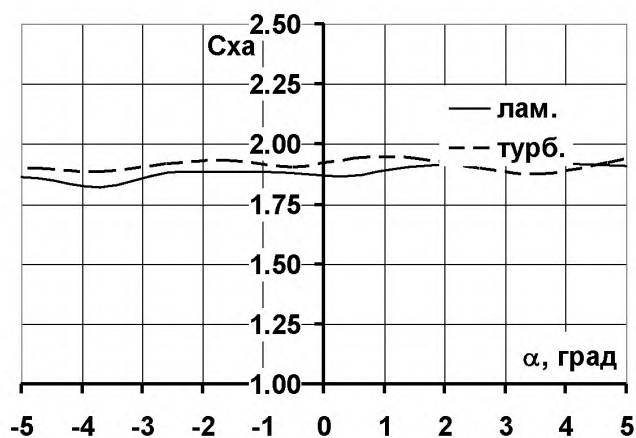
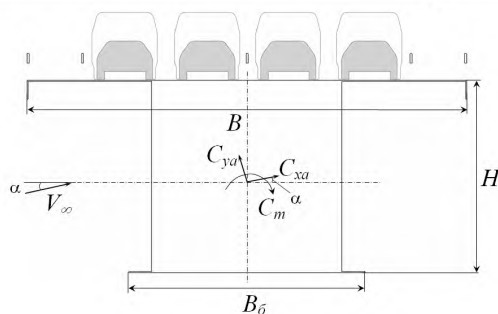


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.60	0.50	0.19	-1.33	-0.06	-0.64
турб.	1.68	0.51	0.19	-3.09	-0.47	-2.36

Балка прямоугольного сечения с перекрытием,
ограждениями и автотранспортом
($B/H=2.3$, $B_a/H=1.24$, $H_i/H=0.142$, $H_o/H=0.529$)

Диаграмма 3-4

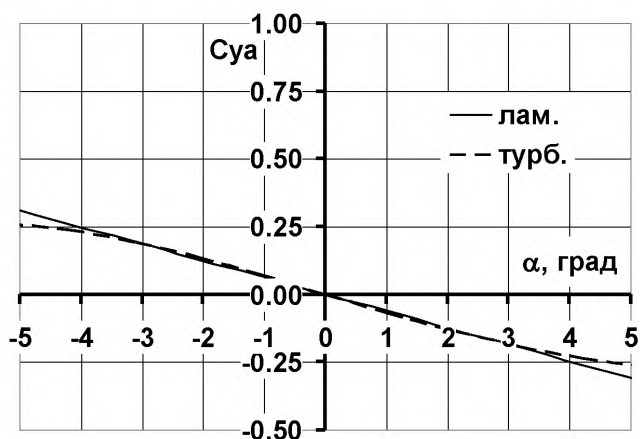
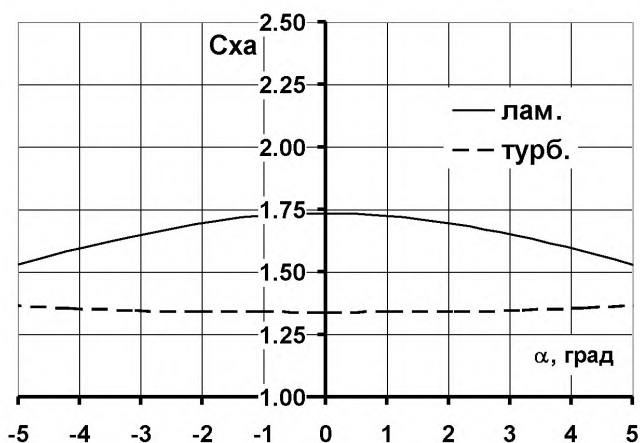
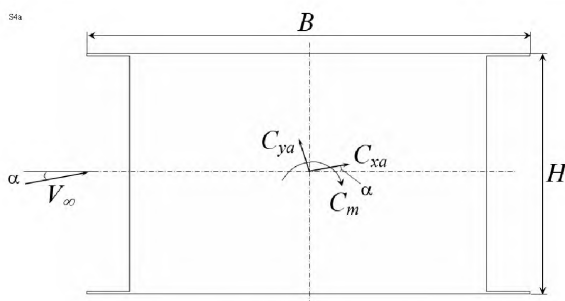


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.89	0.40	0.21	-0.54	0.00	0.28
турб.	1.93	0.34	0.20	-1.47	-0.29	-0.63

Балка прямоугольного сечения
($B/H = B_a/H = 1.85$)

Диаграмма 4-1

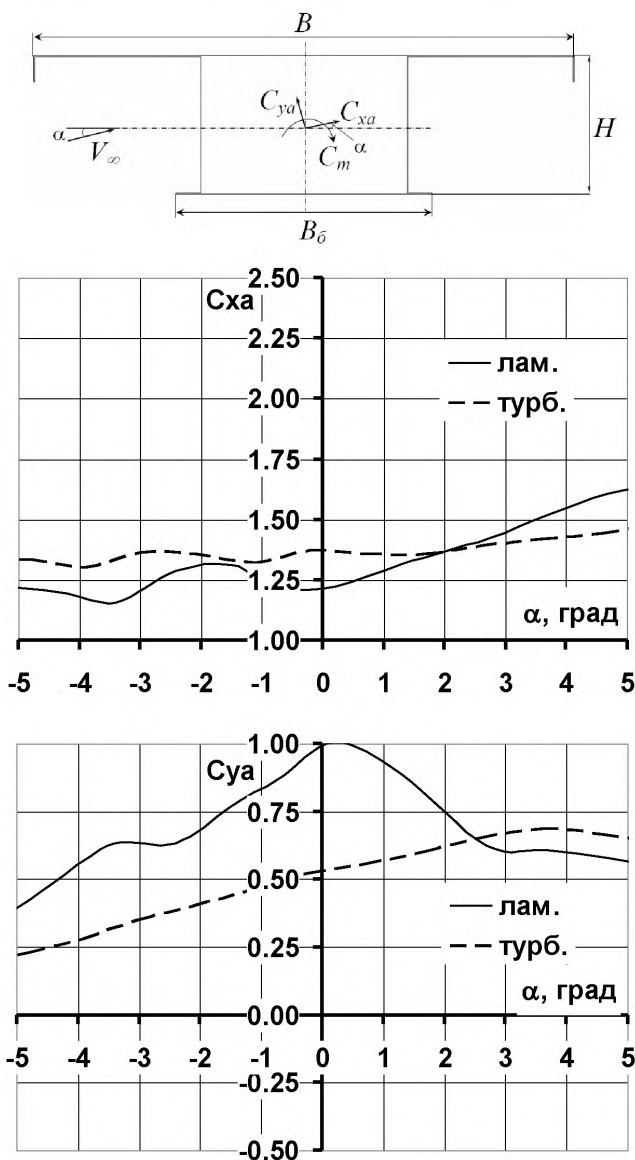


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.73	0	0	-3.55	0.73	-2.61
турб.	1.34	0	0	-3.84	0.20	-3.12

Балка прямоугольного сечения с перекрытием
($B/H=3.9$, $B_a/H=1.85$)

Диаграмма 4-2

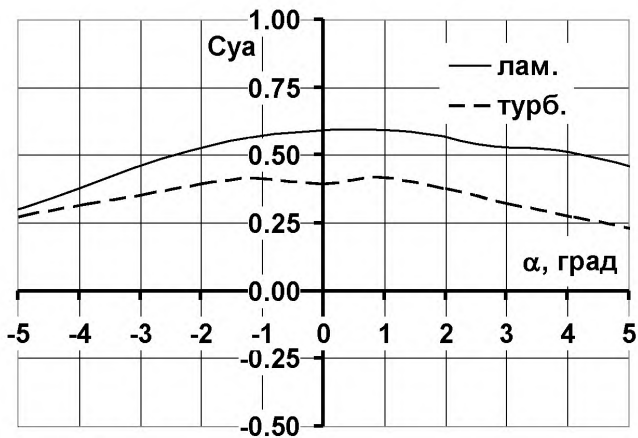
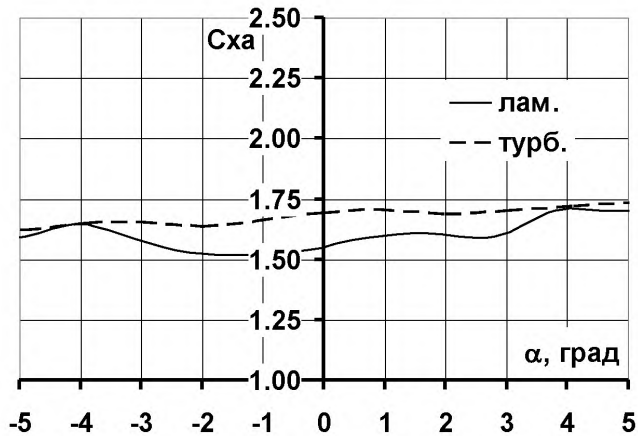
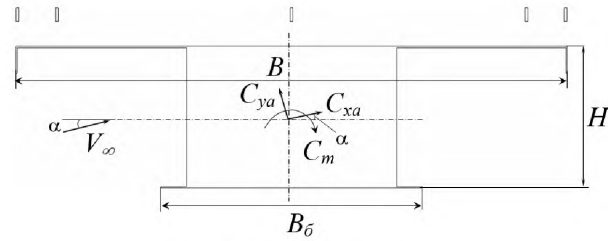


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.24	0.95	0.21	2.25	-1.60	2.56
турб.	1.35	0.52	0.27	3.02	0.01	3.37

Балка прямоугольного сечения
с перекрытием и ограждениями
($B/H=3.9$, $B_a/H=1.85$, $H_i/H=0.275$)

Диаграмма 4-3

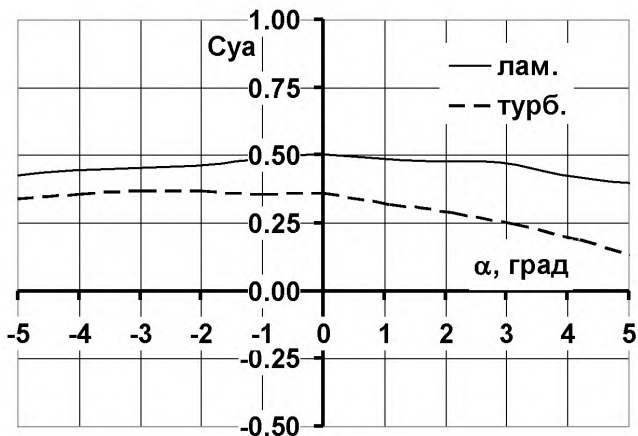
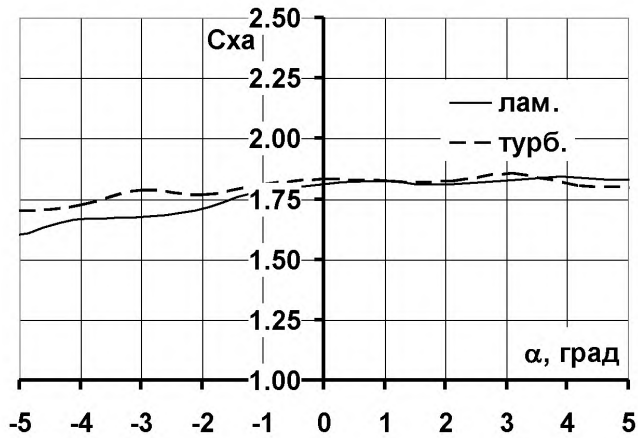
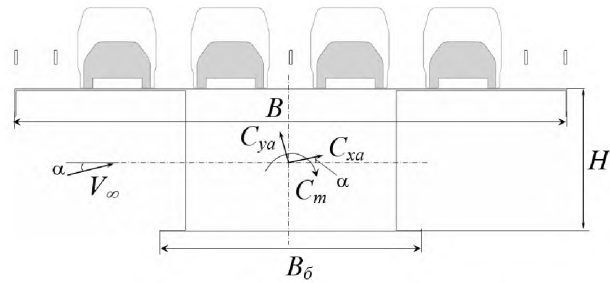


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.54	0.59	0.24	0.33	0.21	0.72
турб.	1.68	0.41	0.24	-0.14	-0.10	0.29

Балка прямоугольного сечения с перекрытием,
ограждениями и автотранспортом
($B/H=3.9$, $B_a/H=1.85$, $H_i/H=0.275$, $H_o/H=1.021$)

Диаграмма 4-4

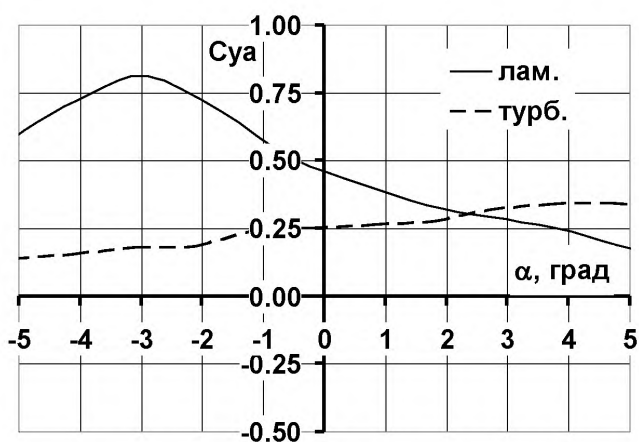
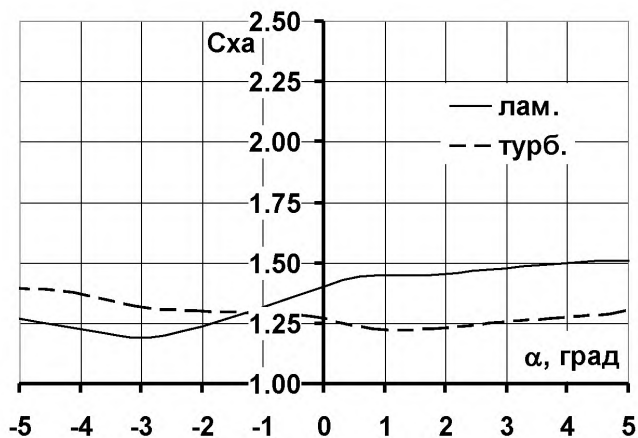
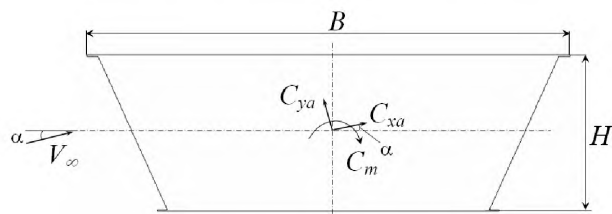


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.81	0.50	0.20	0.38	0.14	0.85
турб.	1.82	0.35	0.18	-1.05	0.10	-0.59

Балка трапецевидного сечения
($B/H = 3.09$, $B_a/H = 3.09$)

Диаграмма 5-1

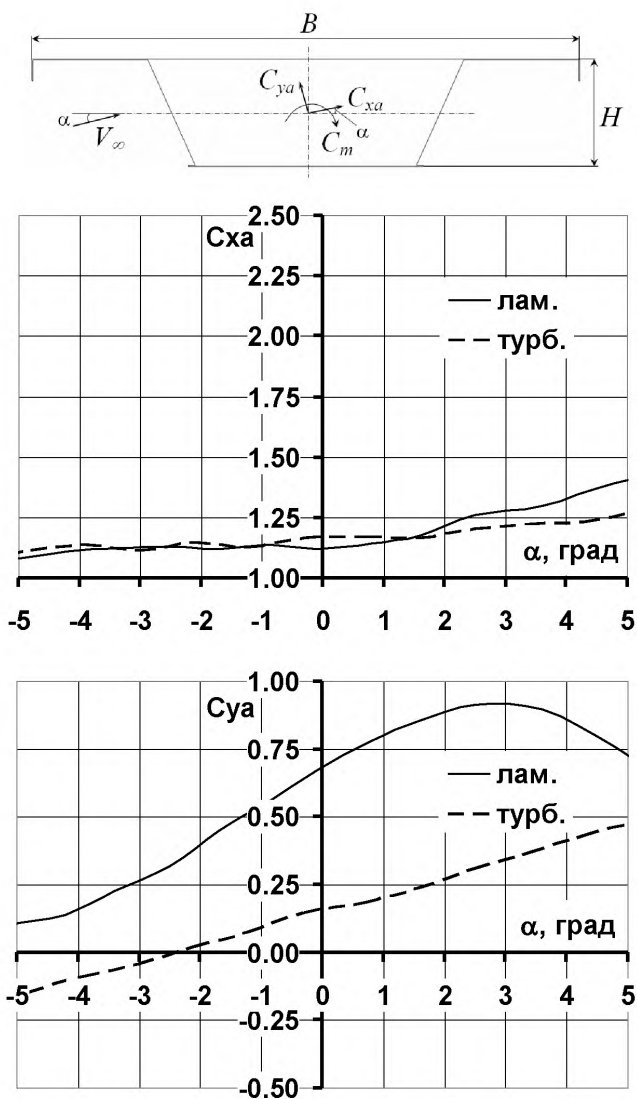


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.40	0.46	0.11	-6.76	-0.35	-6.31
турб.	1.26	0.25	0.26	1.18	-0.87	1.59

Балка трапециевидного сечения с перекрытием
($B/H = 5.1$, $B_a/H = 3.09$)

Диаграмма 5-2

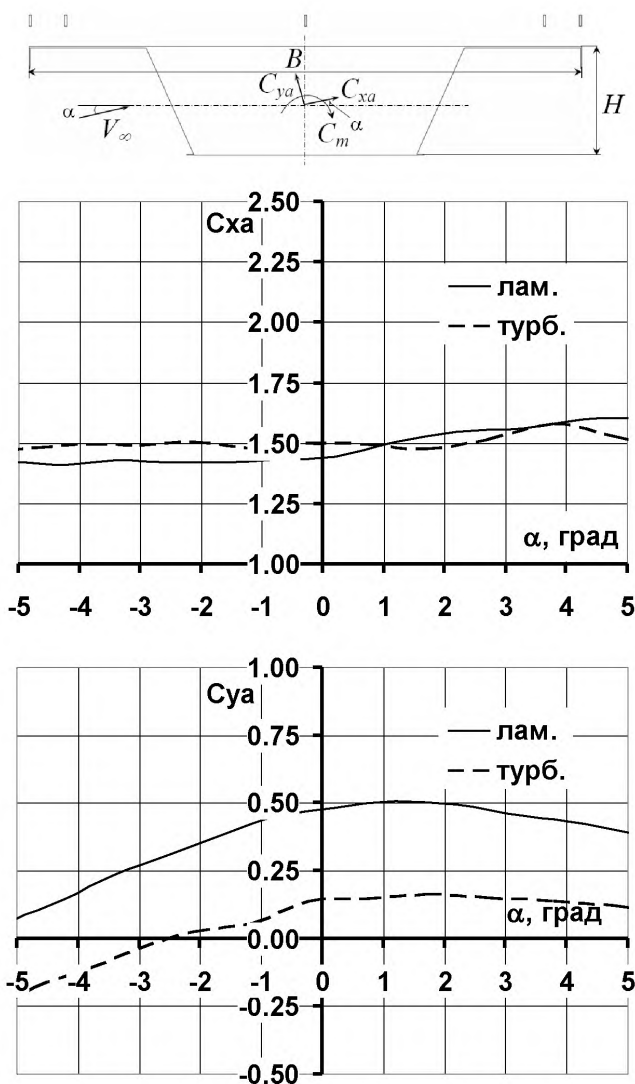


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.13	0.68	0.30	7.68	0.65	7.90
турб.	1.16	0.15	0.23	3.39	1.40	3.61

Балка трапецевидного сечения
с перекрытием и ограждениями
($B/H=5.1$, $B_a/H=3.09$, $H_i/H=0.293$)

Диаграмма 5-3

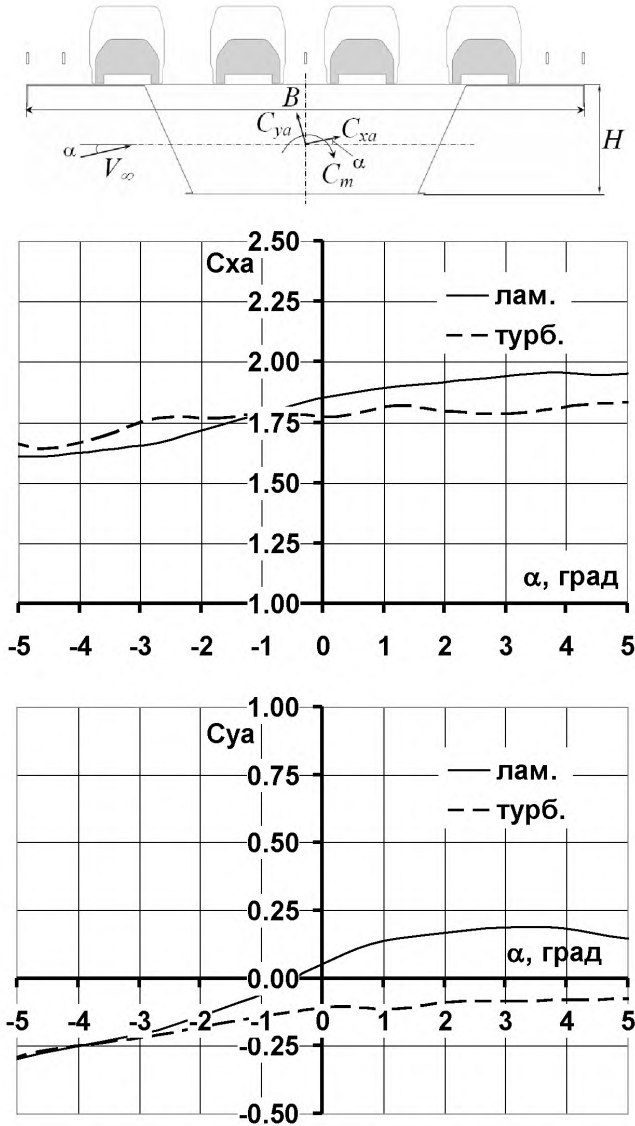


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.45	0.48	0.21	2.10	0.07	2.38
турб.	1.48	0.13	0.17	2.01	0.07	2.29

Балка трапецевидного сечения с перекрытием,
ограждениями и автотранспортом
($B/H = 5.1$, $B_a/H = 3.09$, $H_i/H = 0.293$, $H_o/H = 1.088$)

Диаграмма 5-4

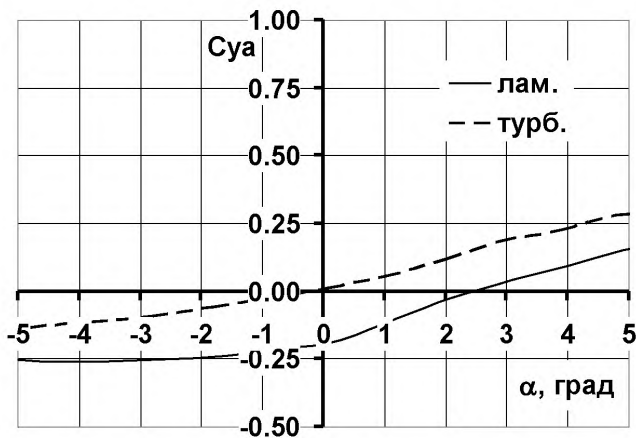
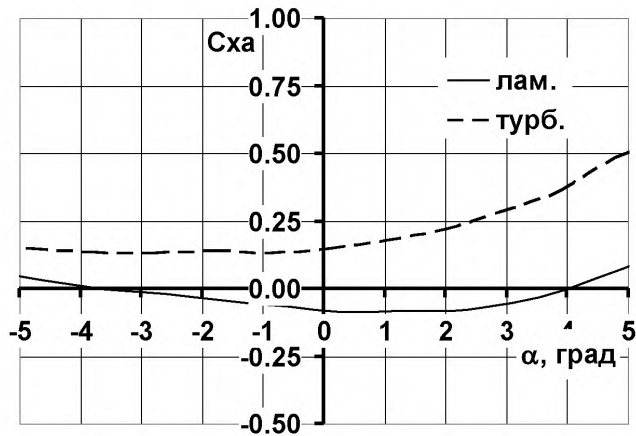
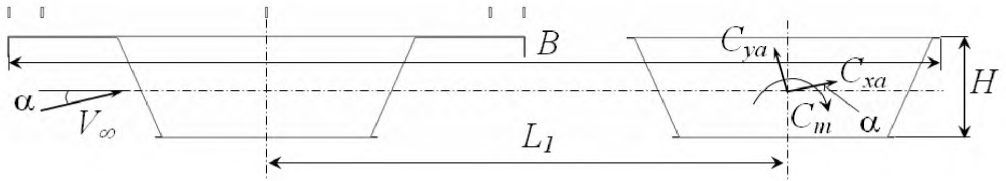


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	1.85	0.05	0.11	5.28	1.00	5.64
турб.	1.79	-0.12	0.08	1.21	0.84	1.56

Балка трапецевидного сечения, расположенная за аналогичной балкой с перекрытием и ограждениями
($B/H = 8.19$, $B_4/H = 3.09$, $L_1/H = 5.1$, $H_i/H = 0.293$)

Диаграмма 5-5

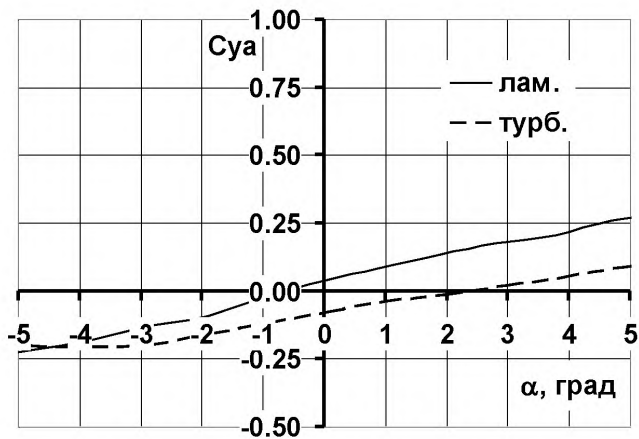
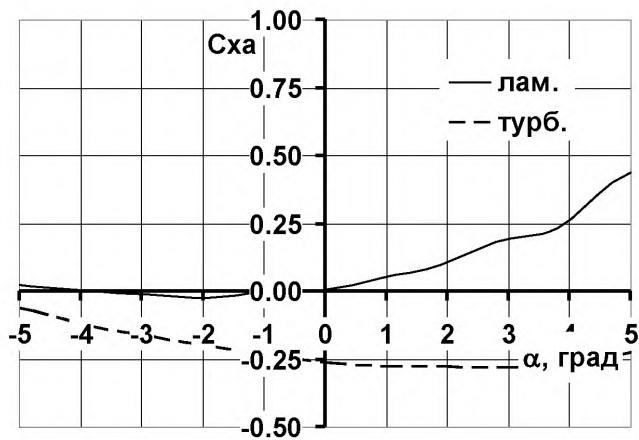
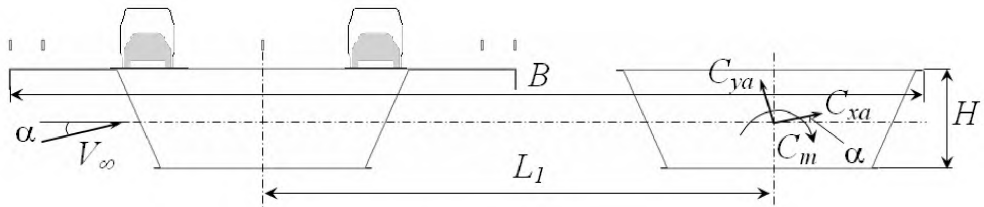


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	-0.08	-0.19	-0.02	3.07	0.41	3.05
турб.	0.15	0.01	0.03	2.61	0.19	2.66

Балка трапецевидного сечения, расположенная за аналогичной балкой с перекрытием, ограждениями и автотранспортом
($B/H = 8.19$, $B_a/H = 3.09$, $L_1/H = 5.1$, $H_1/H = 0.293$, $H_o/H = 1.088$)

Диаграмма 5-6

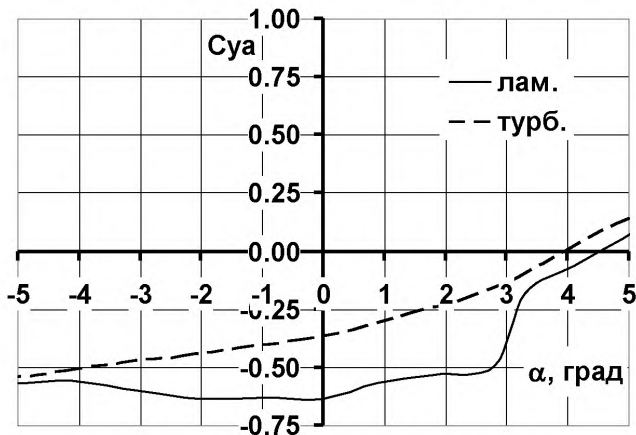
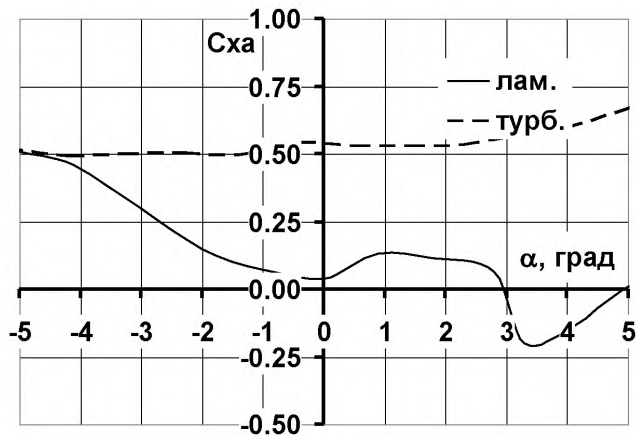
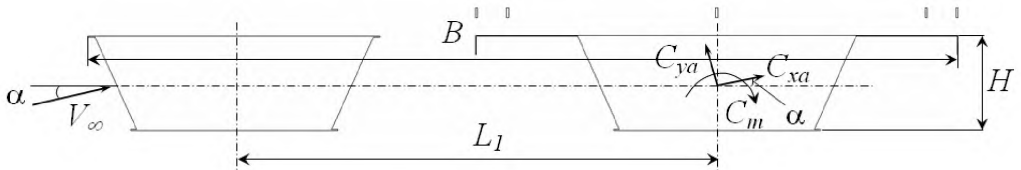


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	0.00	0.03	0.03	3.23	0.04	3.23
турб.	-0.26	-0.09	0.00	2.23	0.29	2.15

Балка трапецевидного сечения с перекрытием и
ограждениями, расположенная за аналогичной балкой без
перекрытия и ограждений
($B/H = 8.19$, $B_a/H = 5.1$, $L_1/H = 5.1$, $H_i/H = 0.293$)

Диаграмма 5-7

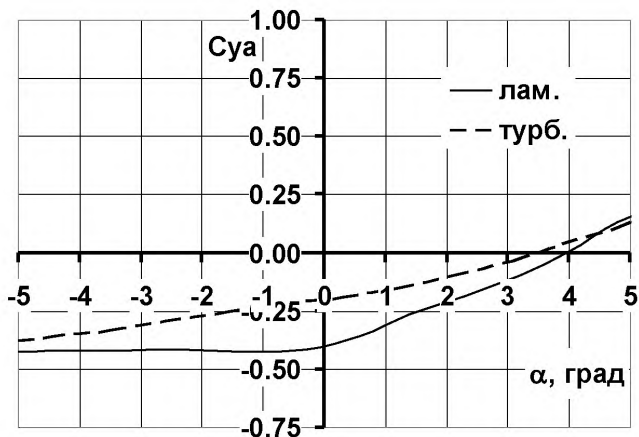
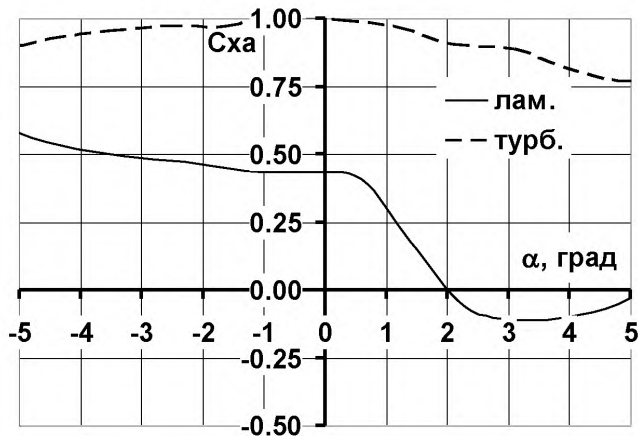
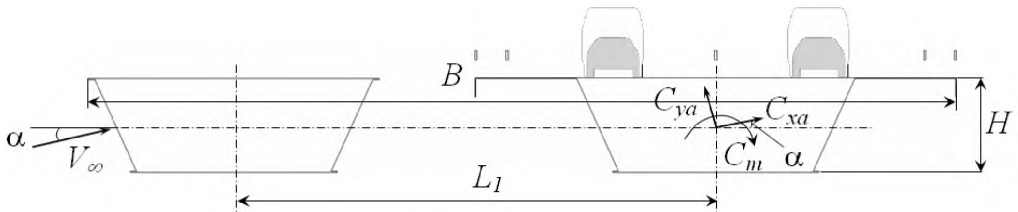


Характеристики при нулевом угле атаки:

поток	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	0.04	-0.64	-0.08	2.37	1.02	2.38
турб.	0.53	-0.36	0.01	2.70	0.68	2.80

Балка трапецевидного сечения с перекрытием, ограждениями и автотранспортом, расположенная за аналогичной балкой без перекрытия и ограждений
($B/H = 8.19$, $B_a/H = 5.1$, $L_1/H = 5.1$, $H_i/H = 0.293$, $H_o/H = 1.088$)

Диаграмма 5-8

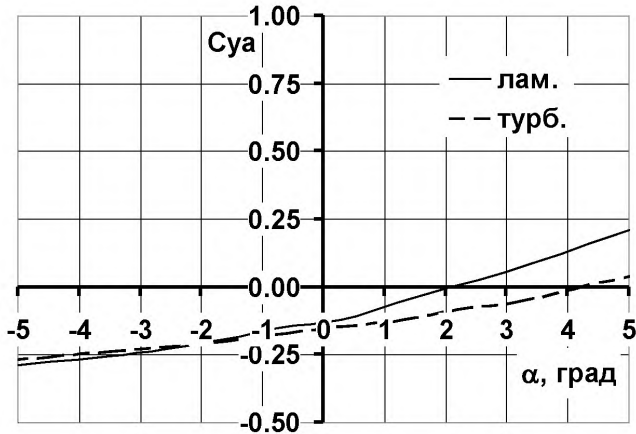
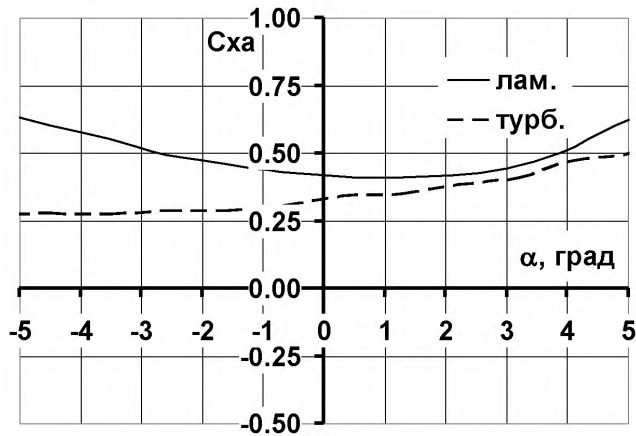
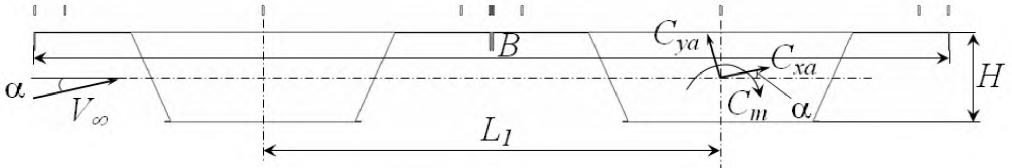


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	0.42	-0.39	-0.09	2.89	1.07	2.98
турб.	0.99	-0.20	-0.04	2.20	0.67	2.39

Балка трапецевидного сечения, с перекрытием и
ограждениями, расположенная за аналогичной
балкой
($B/H=10.2$, $B_a/H=3.09$, $L_1/H=5.1$, $H_i/H=0.293$)

Диаграмма 5-9

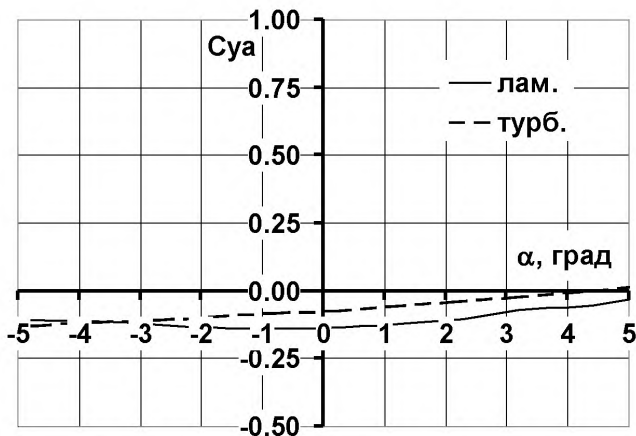
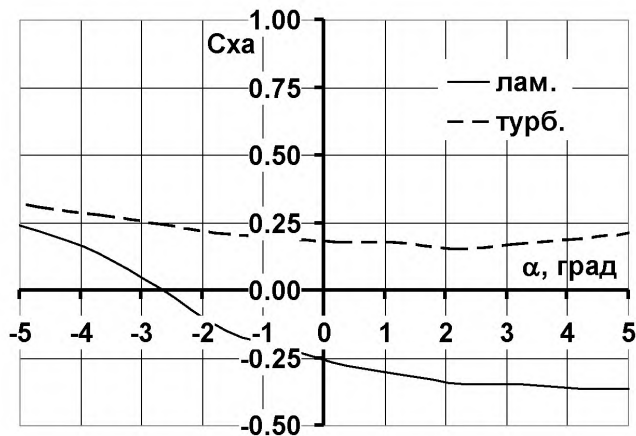
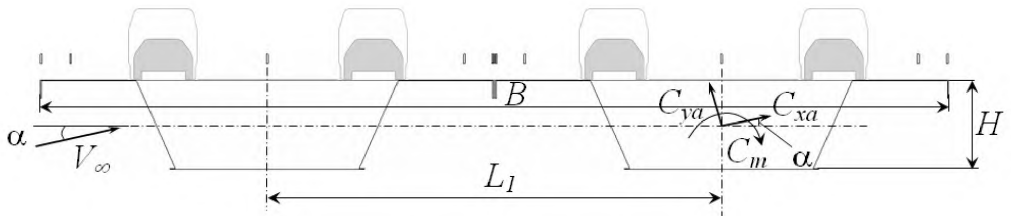


Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	0.42	-0.13	0.02	2.74	0.02	2.83
турб.	0.33	-0.16	0.01	1.60	0.19	1.66

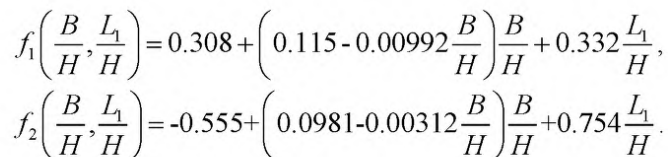
Балка трапецевидного сечения, с перекрытием, ограждениями и
автотранспортом, расположенная за аналогичной балкой
($B/H = 10.2$, $B_a/H = 5.1$, $L_1/H = 5.1$, $H_i/H = 0.293$, $H_o/H = 1.088$)

Диаграмма 5-10



Характеристики при нулевом угле атаки:

ПОТОК	C_{xa0}	C_{ya0}	C_{m0}	C_{ya0}^α	C_{m0}^α	A
лам.	-0.27	-0.14	-0.02	0.39	0.02	0.34
турб.	0.18	-0.08	0.00	0.74	0.11	0.78



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПО СЕЧЕНИЯМ

Приведены эпюры распределения коэффициента статического давления c_p по периметру некоторых типовых поперечных сечений.

Б.1 Многобалочные строения ($L_1/H=3$, диаграмма 1-6 Приложения А)

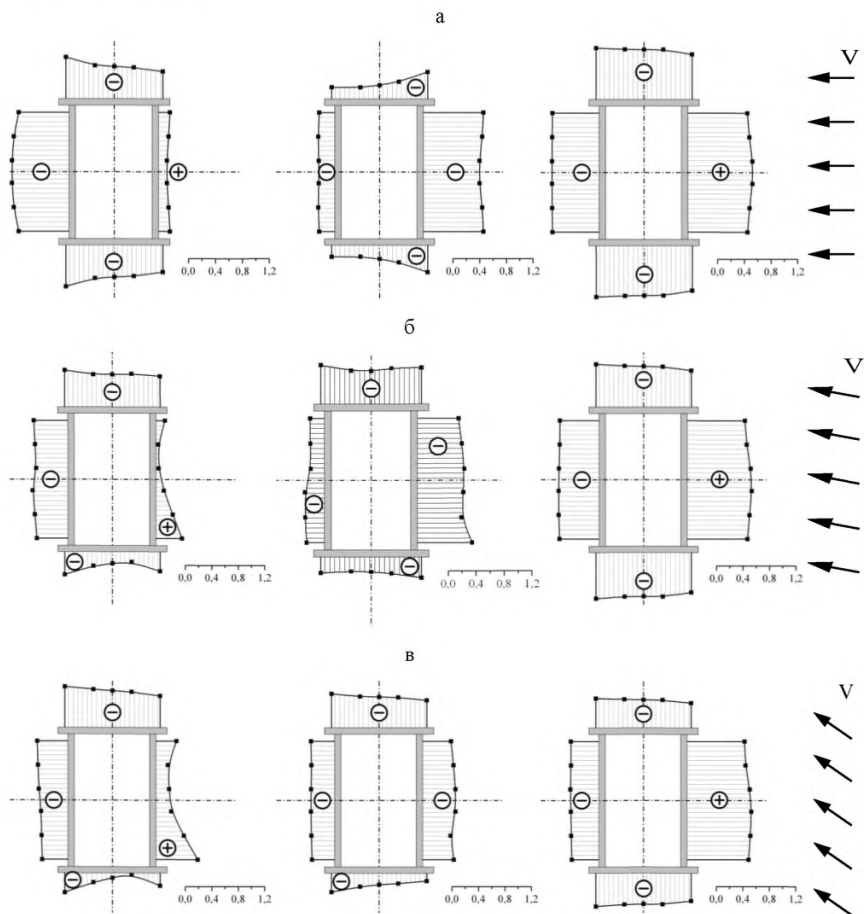
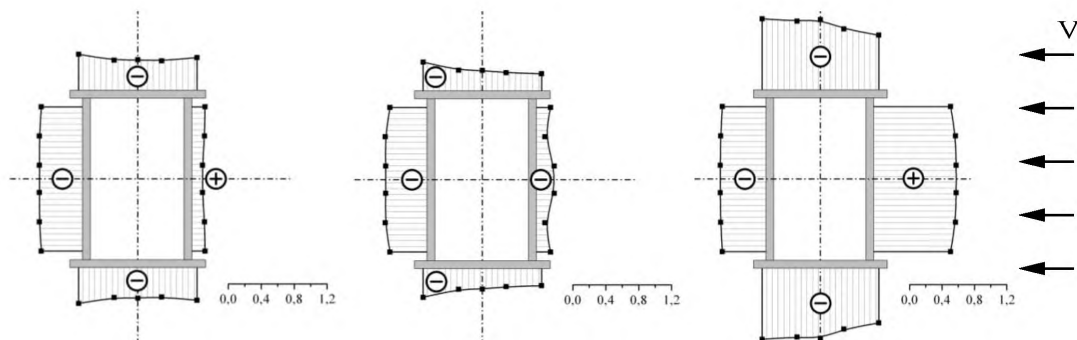


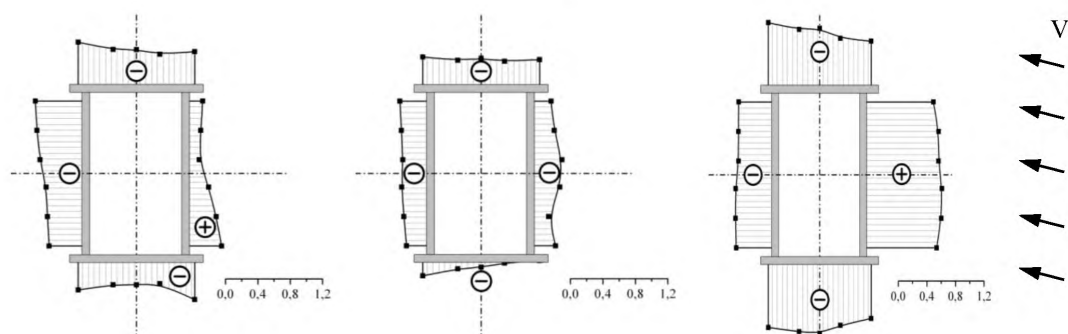
Рисунок Б.1 – Распределение коэффициента давления по периметру трехбалочного сечения в ламинарном потоке в зависимости от угла атаки:

а - $\alpha = 0^\circ$; б - $\alpha = 5^\circ$; в - $\alpha = 10^\circ$.

а



б



в

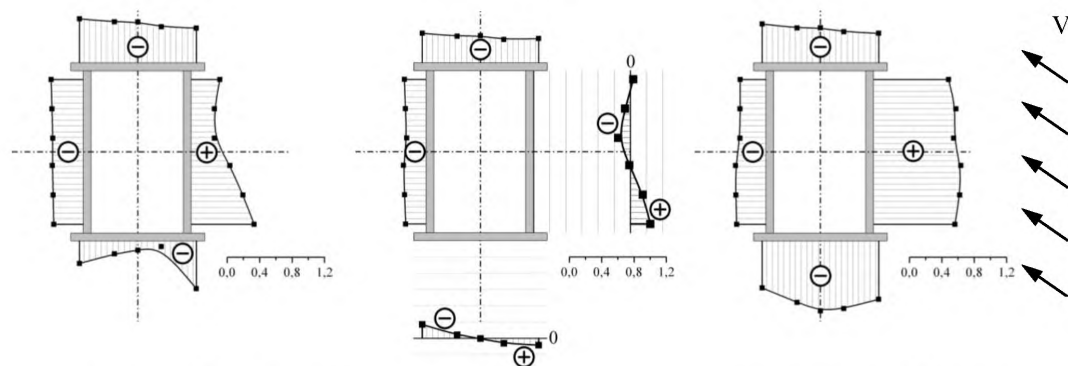


Рисунок Б.2 – Распределение коэффициента давления по периметру трехбалочного сечения в турбулентном потоке в зависимости от угла атаки:
а – $\alpha = 0^\circ$; б – $\alpha = 5^\circ$; в – $\alpha = 10^\circ$.

**Б.2 Строения с трапецевидной балкой (диаграммы 5-3, 5-9
Приложения А)**

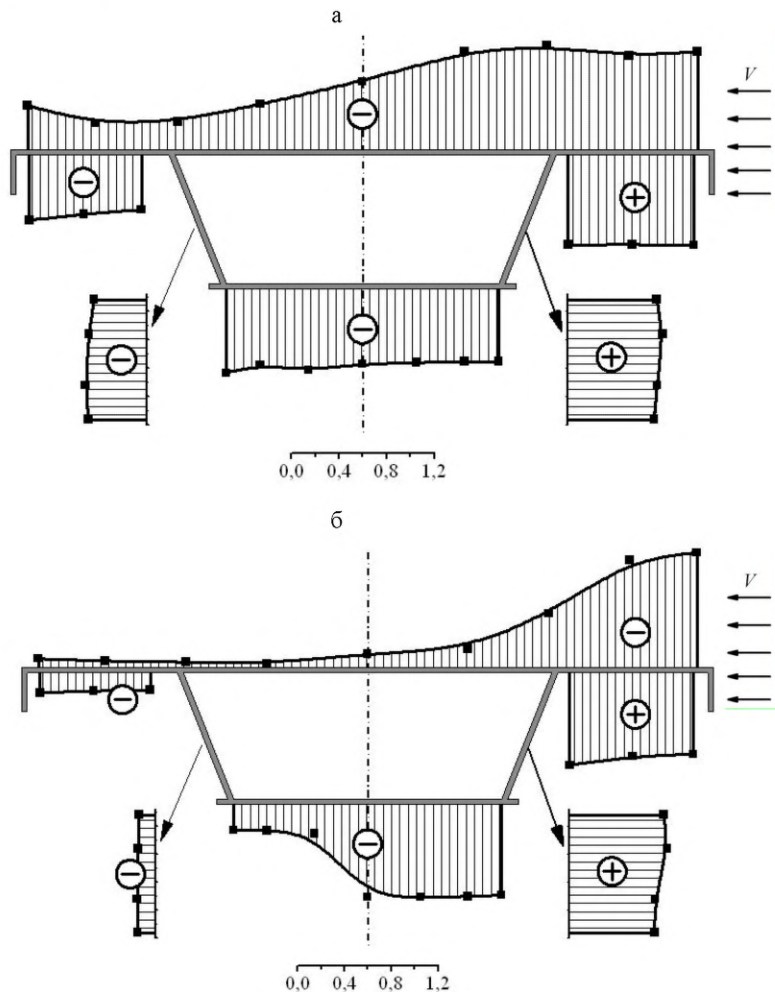


Рисунок Б.3 – Распределение коэффициента давления по периметру трапецевидной балки с перекрытием при $\alpha = 0$: а – ламинарный поток; б – турбулентный поток.

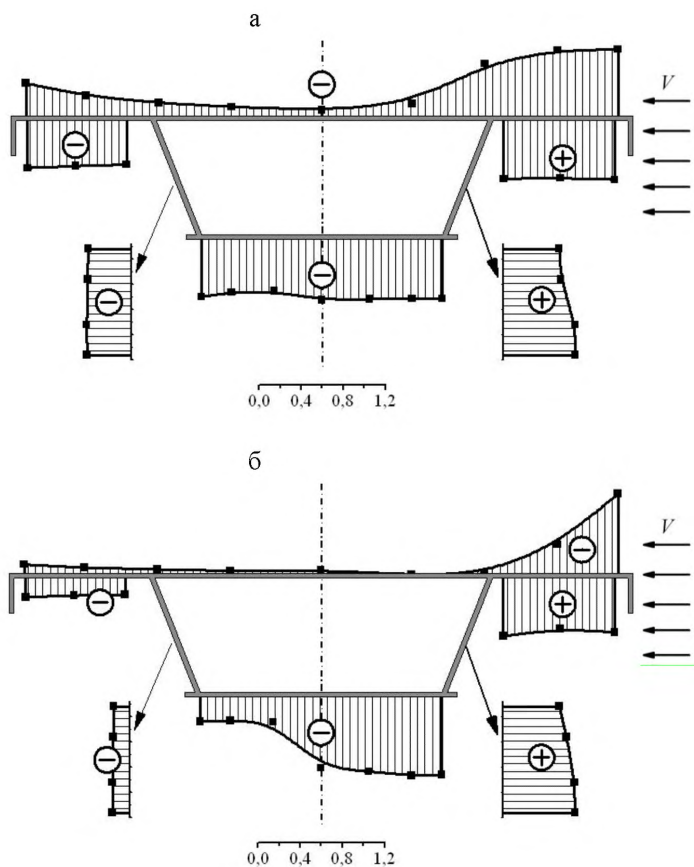


Рисунок Б.4 – Распределение коэффициента давления по периметру трапециевидной балки с перекрытием при $\alpha = -5^\circ$: а – ламинарный поток; б – турбулентный поток.

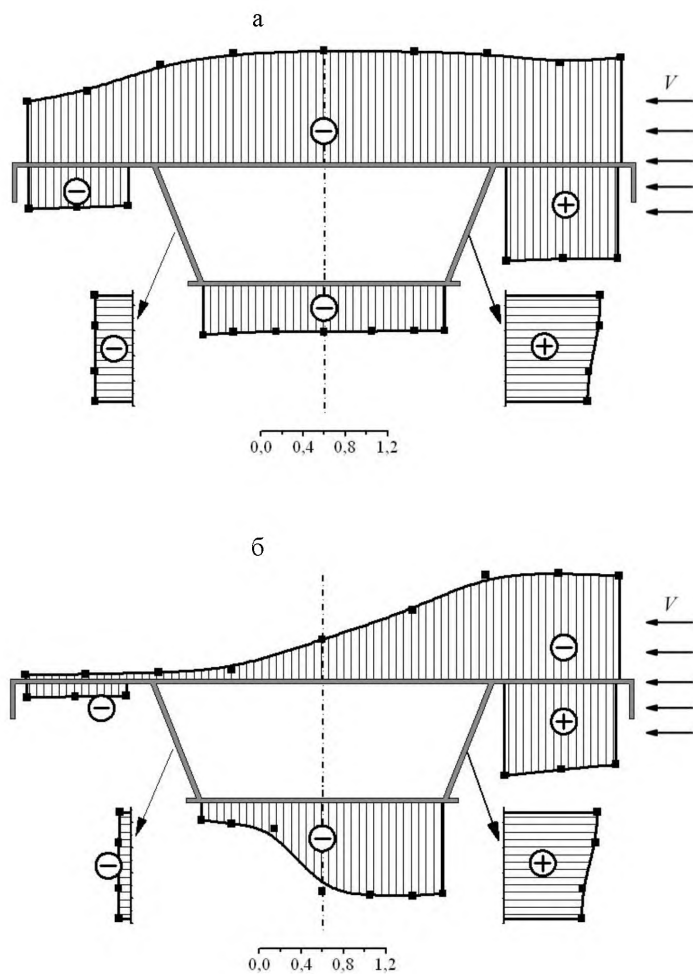
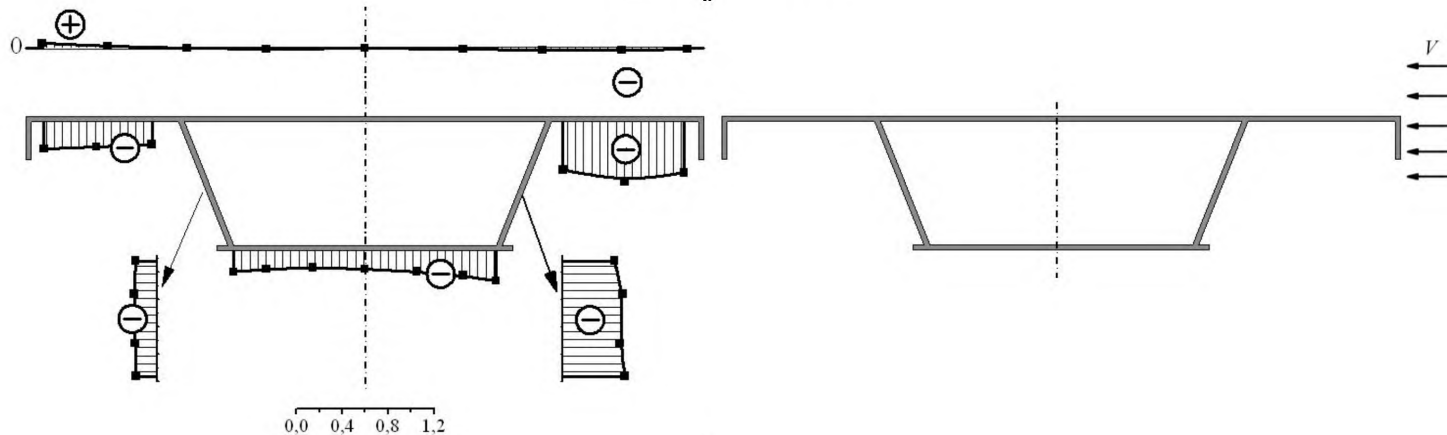


Рисунок Б.5 – Распределение коэффициента давления по периметру трапециевидной балки с перекрытием при $\alpha = 5^\circ$: а – ламинарный поток; б – турбулентный поток.

а



б

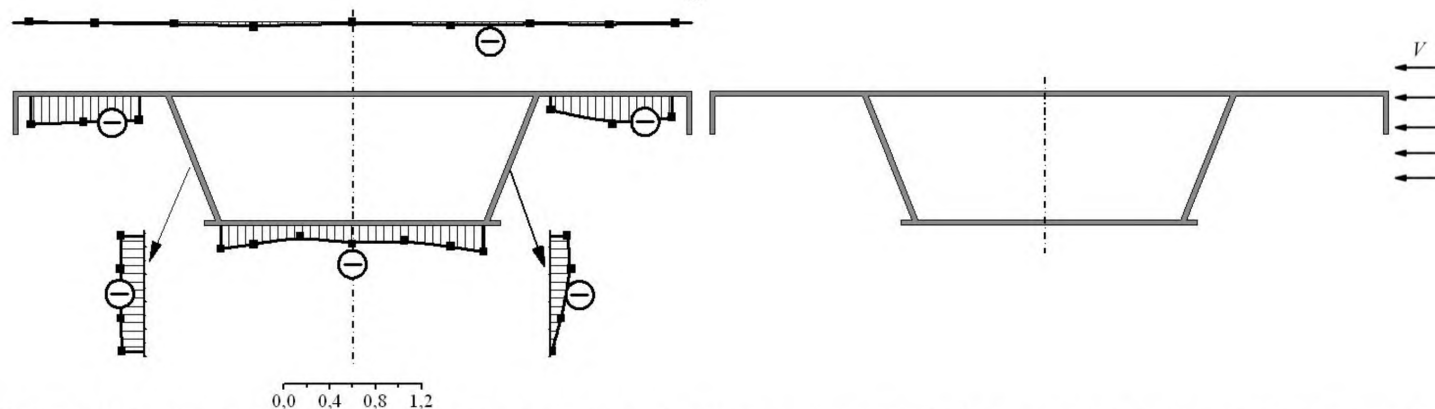


Рисунок Б.6 – Распределение коэффициента давления по периметру трапециевидной балки с перекрытием при расположении за аналогичной балкой ($L_1/H = 5.1$) при $\alpha = 0^\circ$: а) ламинарный поток; б) турбулентный поток

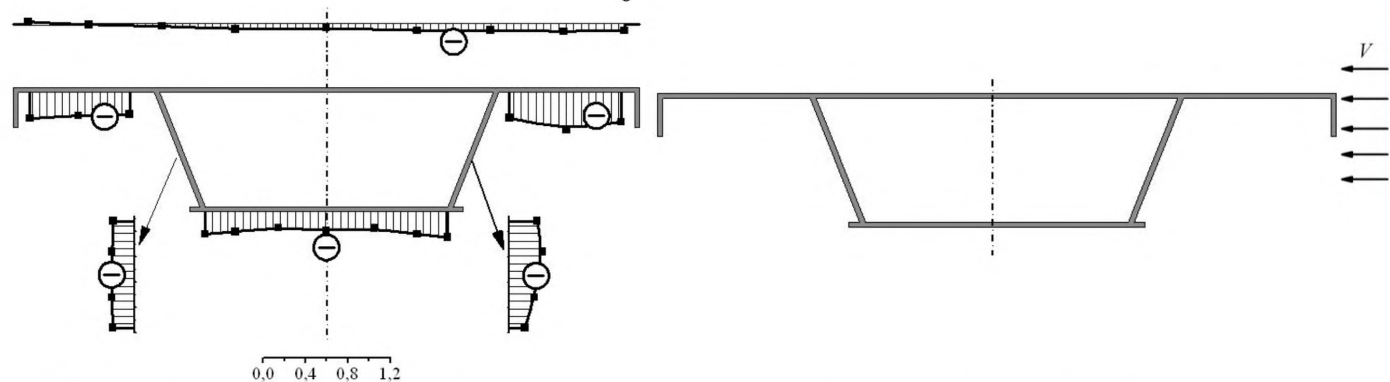
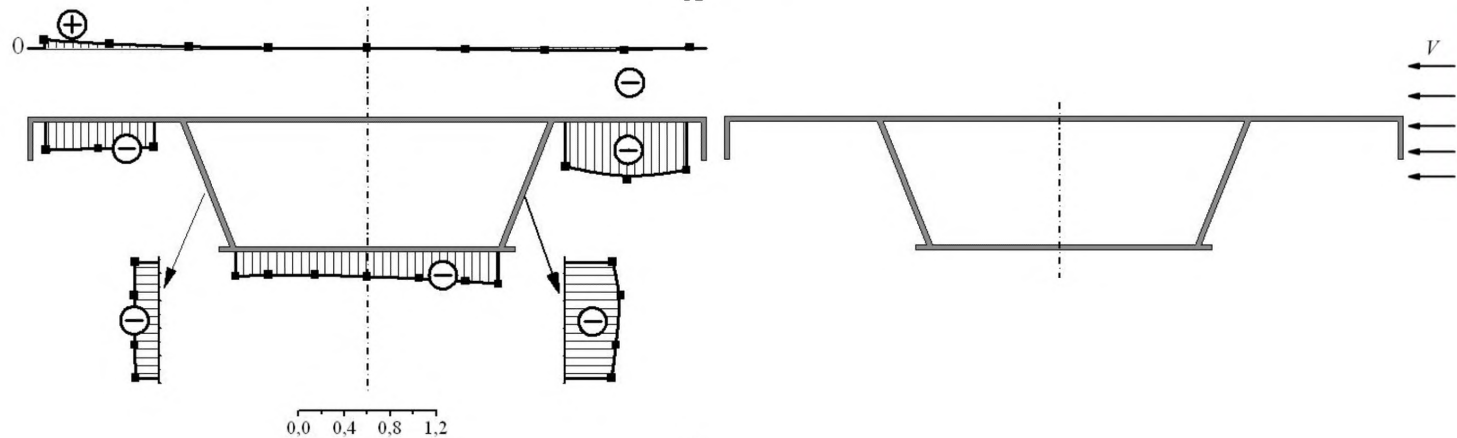
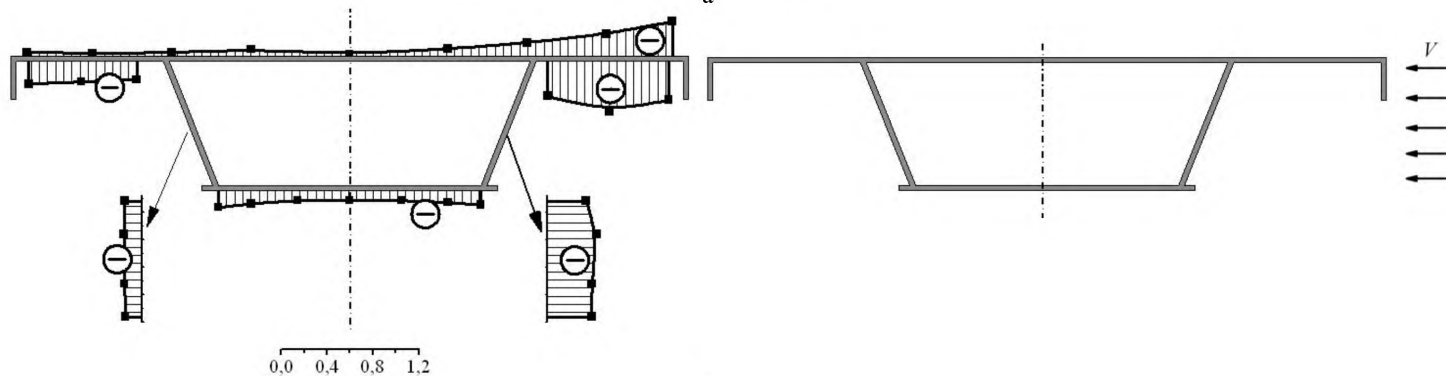


Рисунок Б.7 – Распределение коэффициента давления по периметру трапециевидной балки с перекрытием при расположении за аналогичной балкой ($L_1/H = 5.1$) при $\alpha = -5^\circ$: а) ламинарный поток; б) турбулентный поток.

а



б

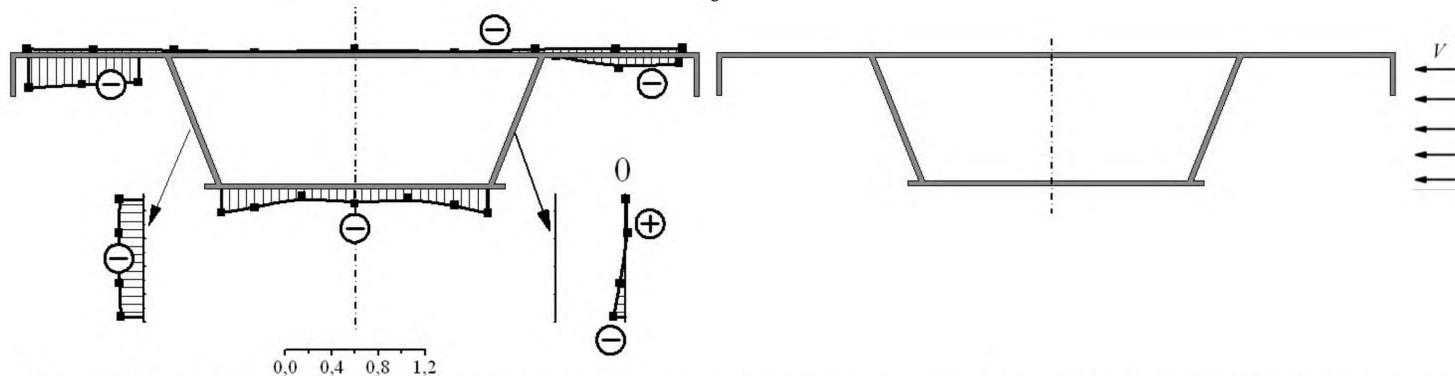
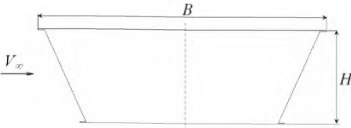
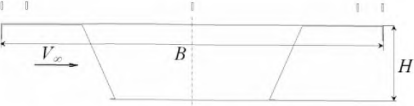
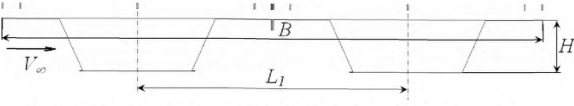
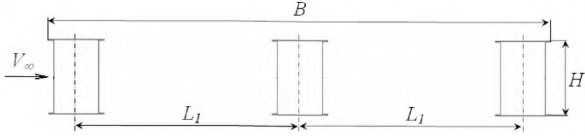


Рисунок Б.8 – Распределение коэффициента давления по периметру трапециевидной балки с перекрытием при расположении за аналогичной балкой ($L_1 / H = 5.1$) при $\alpha = 5^\circ$: а) ламинарный поток; б) турбулентный поток.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ЧИСЛА СТРУХАЛЯ СЕЧЕНИЙ

Для поперечных сечений пролетных строений, наиболее опасных с точки зрения аэроупругих колебаний, в ламинарном и турбулентном потоке при нулевом угле атаки приведены числа Струхали $Sh = f_a H / V_\infty$ (f_a – частота схода вихрей).

Сечение	Sh	
	лам.	турб.
 <p style="text-align: center;">$(B/H = B_a/H = 3.09)$</p>	0.109	0.093
 <p style="text-align: center;">$(B/H = 5.1, B_a/H = 3.09, H_i/H = 0.293)$</p>	0.073	0.096
 <p style="text-align: center;">$(B/H = 10.2, B_a/H = 3.09, L_l/H = 5.1, H_i/H = 0.293)$</p>	0.087	0.113
 <p style="text-align: center;">$(B/H = 6.75, B_a/H = 0.75, L_l/H = 3)$</p>	0.089	0.084

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Описаны условия и методики проведения физических и численных экспериментов.

Г.1 Критерии подобия

При моделировании необходимо в первую очередь обеспечить геометрическое подобие внешних форм модели и натурного объекта. Возможность выполнить это требование в большой степени зависит от выбора масштаба модели, который определяется размерами имеющейся в распоряжении исследователей аэродинамической трубы.

В данной работе использовалась аэродинамическая труба Т-503 с диаметром рабочей части 1.2 м. Размер секционных моделей поперек потока ограничивался $l = 0.6$ м. Исходя из минимально допустимого удлинения модели $l/H = 5$, поперечного размера натуральных строений $H = 2...7$ м, был выбран масштаб секционных моделей 1:70.

Поскольку задачей данной работы было исследование осредненных по времени аэродинамических коэффициентов неподвижных сооружений, то эксперименты проводились на жестких моделях, и главным условием выполнения подобия являлся критерий Рейнольдса.

Моделирование по *критерию Рейнольдса* предполагает равенство соотношений между силами вязкости и инерции на реальном объекте и на модели (здесь и далее индекс «н» относится к натурному сооружению, индекс «м» – к модели):

$$Re = idem \quad \text{или} \quad \frac{V_n H_n}{\nu_n} = \frac{V_m H_m}{\nu_m}.$$

Учитывая, что вязкость воздуха в реальных условиях и при моделировании в аэродинамической трубе практически одна и та же, а размеры модели примерно на два порядка меньше, чем реального объекта, достичь подобия по числу Рейнольдса на малоразмерных моделях при одной

и той же рабочей среде, в натурных и модельных условиях практически невозможно. Один из путей решения проблемы связан с учетом существования области автомодельности течения для плохообтекаемых тел. Экспериментальные исследования плохообтекаемых тел с острыми кромками показывают [Г1], что в достаточно широком диапазоне чисел Рейнольдса ($10^4 < Re < 10^7$) аэродинамические характеристики тел не претерпевают существенных изменений. Учитывая, что в исследуемой задаче скорость набегающего потока составляет в среднем 20 м/с, число Рейнольдса, вычисленное по высоте сечения, $Re_m = VH/\nu \sim 0.3 \cdot 10^5$, то есть находится в автомодельной зоне.

Непременным условием моделирования нестационарных явлений является соблюдение *критерия гомохронности*, то есть единовременности протекания нестационарных физических процессов для натурального и модельного объектов, что характеризуется равенством чисел Струхалия:

$$Sh = idem \quad \text{или} \quad \frac{f_n H_n}{V_n} = \frac{f_m H_m}{V_m}.$$

Здесь f – характерная частота процесса. Если, например, это частота схода вихрей, то ей соответствует аэродинамическое число Струхалия, если частота колебаний конструкции – кинематическое [Г2].

Условие подобия степени турбулентности $\varepsilon_\infty = idem$ требует, чтобы структура набегающего потока в аэродинамической трубе соответствовала натурному ветру, то есть должно быть соблюдено подобие вертикальных градиентов скорости, интенсивности и масштаба турбулентности, спектра пульсаций.

Г.2 Особенности исследуемых сечений

Ширина проезжей части моделей B_n определялась по четному числу полос n_l для движения автотранспорта при ширине одной полосы $W_1 = 3$ или 2.5 м: $B_n = n_l W_1$. Оставшаяся часть полотна делилась на две пешеходные

дорожки с внутренними и внешними перилами. В середине проезжей части размещался разделительный барьер.

Все ограждения имели одинаковые размеры $H_o = 1$ м и $H_{щ} = 0.35$ м для натуральных условий (14,3 мм и 5 мм соответственно на моделях), которые соотносились с затененностью 0.3...0.4 ограждений, используемых на практике.

При размещении на проезжей части автотранспортных средств воспроизводилась ситуация трафика на натурном строении со средней дистанцией между автомобилями в одном ряду 3...4 м (рисунок Г.1).

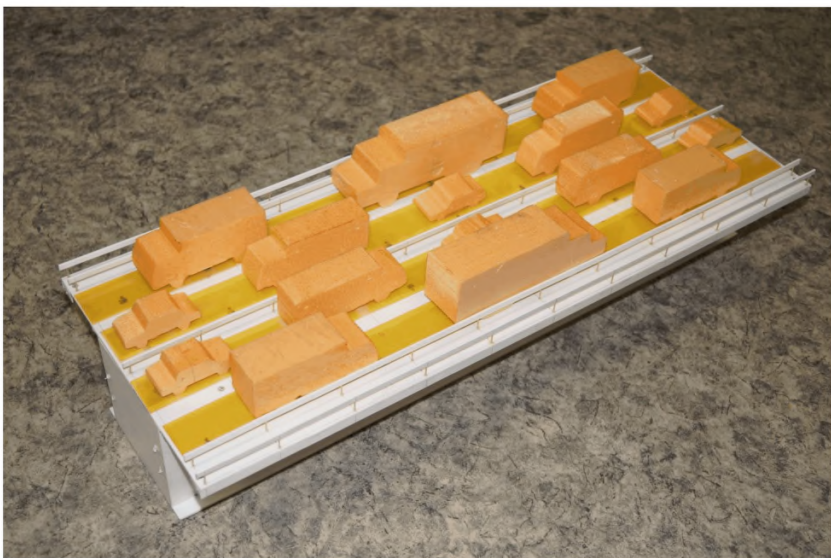


Рисунок Г.1 – Секционная модель с автотранспортными средствами на проезжей части.

Г.3 Физическое моделирование

Погрешности измерений. Аэродинамический стенд Т-503 прошел предварительную метрологическую аттестацию, в результате которой определены следующие характеристики стенда в диапазоне скоростей воздушного потока 10...60 м/с:

- Стабильность скорости $\pm 0.5\%$.
- Среднее значение коэффициента статического давления в рабочей зоне $C_{р\text{ср}} = -0.0007$.
- Градиент коэффициента статического давления по оси рабочей части.

$$\frac{\partial C_p}{\partial x} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}.$$

- Неравномерность поля скоростных напоров (скоростей) не более 1%.
- Относительная погрешность воспроизведения скорости не более

$$\delta_V \leq \frac{0.003}{V} + 0.015.$$

Погрешности основных видов экспериментов приведены в табл. Г.1.

Таблица Г.1 Погрешности аэродинамических испытаний при доверительном интервале $P=95\%$

Вид эксперимента	Погрешность, %
весовой	2
дренажный	2
термоанемометрический	1

Спектральные характеристики потока. Моделирование параметров приземного слоя атмосферы на высоте расположения строения достигалось установкой на срезе сопла решетки со специально подобранными параметрами, а также, при необходимости, экрана в рабочей части.

Полученные на аэродинамическом стенде Т-503 спектральные характеристики пульсаций потока (за исключением области низких частот, соответствующей масштабам турбулентности, на порядки превосходящим размер сооружений) хорошо согласовывались с общепринятыми спектрами Давенпорта [Г3], Кеймала [Г4] и Колмогова [Г5]. Значение степени турбулентности потока в месте установки моделей составляло около 7...9%.

Влияние удлинения модели. Для уменьшения влияния эффектов, связанных с конечностью размаха, по бокам моделей устанавливались концевые шайбы (рисунок Г.2).

В данной работе кроме традиционных поправок при весовых испытаниях (на взаимное влияние компонент весов, влияние проекций веса модели и весов при изменении угла тангажа, на угол атаки от скоса потока, 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 балки квадратного поперечного сечения. Испытания показали хорошее совпадение с известными результатами (коэффициент лобового сопротивления при нулевом угле атаки $c_{xa} = 2.15$ в данных экспериментах, при $c_{xa} = 2.04 \dots 2.3$ по данным [Г6-Г9], $c_{xa} = 2.1$ по СНиП [Г10] и Еврокоду [Г11]).



Рисунок Г.2 – Весовые испытания модели в турбулизированном потоке над экраном

Влияние числа Рейнольдса. Для обоснования справедливости результатов, полученных при числах Рейнольдса, меньших натурных, для каждой из исследованных моделей проводились весовые испытания при нулевом угле атаки и изменении скорости потока от минимальной (по допустимым погрешностям измерения скорости и аэродинамических сил) до максимальной (по допустимым аэродинамическим силам на тензовесах).

Примеры зависимостей коэффициентов аэродинамических сил от числа Рейнольдса представлены на рисунке Г.3. Коэффициенты обезразмерены по площади модели в плане $S_{пл}$. Из рисунка Г.3 видно, что в данной серии экспериментов подтверждена независимость аэродинамических коэффициентов от числа Рейнольдса в исследованном диапазоне $3 \cdot 10^4 \dots 1.2 \cdot 10^5$.

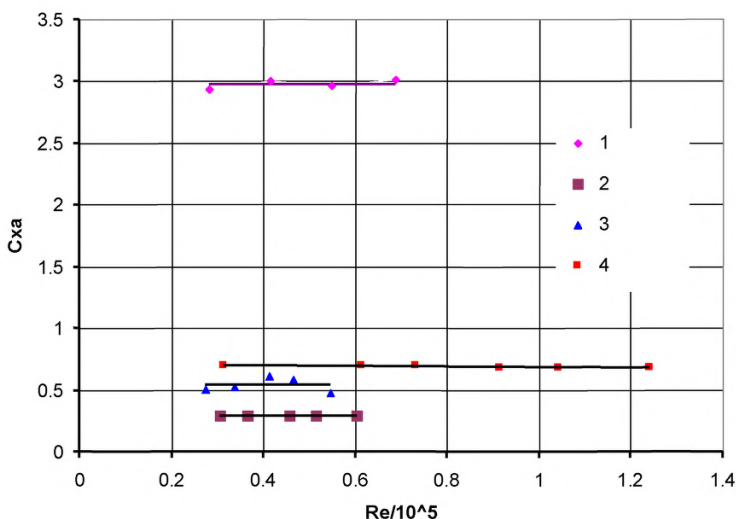


Рисунок Г.3 – Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса. Формы сечений: 1 – диаграмма 1-1, 2 – 5-3, 3 – 1-6, 4 – 3-3.

Влияние высоты расположения строения над подстилающей поверхностью. Пролетные строения мостов в натурных условиях обычно

располагаются на высоте $H_{\text{ср}}$ над подстилающей поверхностью, на порядок превышающей характерную высоту строения $H_{\text{ср}}$ (рисунок Г.4).

При этом изменение скорости набегающего dV потока по высоте строения по сравнению со средней скоростью на высоте строения $V_{\text{ср}}$ мало. Например, при степенном законе изменения скорости по высоте $V/V_0 = (z/z_0)^\beta$ с показателем $\beta=0.2$, $H_{\text{ср}}=20$ м, $H_{\text{ср}}=4$ м изменение скорости по высоте строения составит не более $\pm 2\%$ (рисунок Г.4), то есть строение обдувается набегающим потоком с практически постоянной скоростью. Следовательно, если влияние подстилающей поверхности (в экспериментах – экрана) мало, то можно проводить опыты в равномерном потоке без экрана с турбулентными характеристиками, соответствующими средней высоте расположения строения $H_{\text{ср}}$.

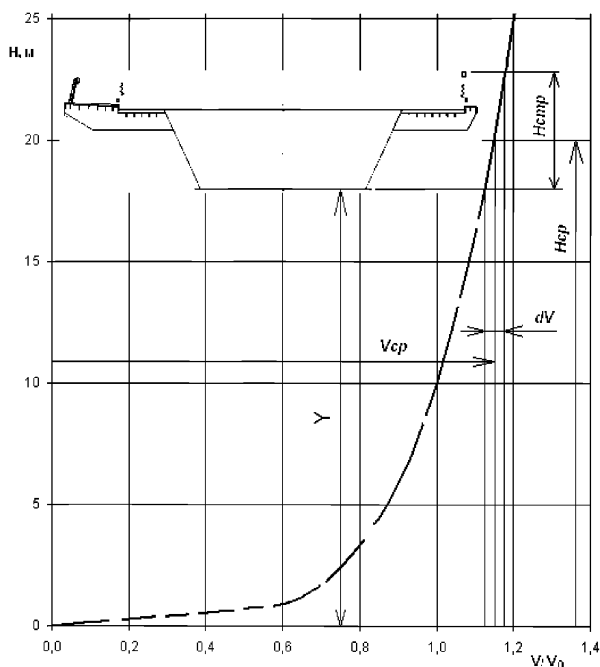


Рисунок Г.4 – Схема обтекания пролетного строения градиентным потоком

Для выяснения степени влияния экрана и относительной высоты расположения строения, выше которой экраном можно пренебречь, были проведены опыты для модели однобалочного пролетного строения с плитой и ограждениями (схему сечения см. в Приложении А, диаграмма 3.3) при варьировании расстояния Y от нижней точки строения до экрана.

Эксперименты проводились как в малотурбулентном потоке при $Re = 1.3 \cdot 10^5$, так и за турбулизирующей решеткой при $Re = 1 \cdot 10^5$. Результаты представлены на рисунках Г.5 и Г.6. Здесь $c_{xa\infty}$ и $c_{ya\infty}$ – аэродинамические коэффициенты сечения при большом удалении от экрана.

Из рисунков видно, что влияние экрана на лобовое сопротивление практически не сказывается при относительных расстояниях до экрана $Y/H_{стр} > 1$. Подъемная сила по мере приближения к экрану изменяется на 10% при $Y/H_{стр} \approx 1,5$, но при $Y/H_{стр} = 1$ ее изменение достигает уже 40%.

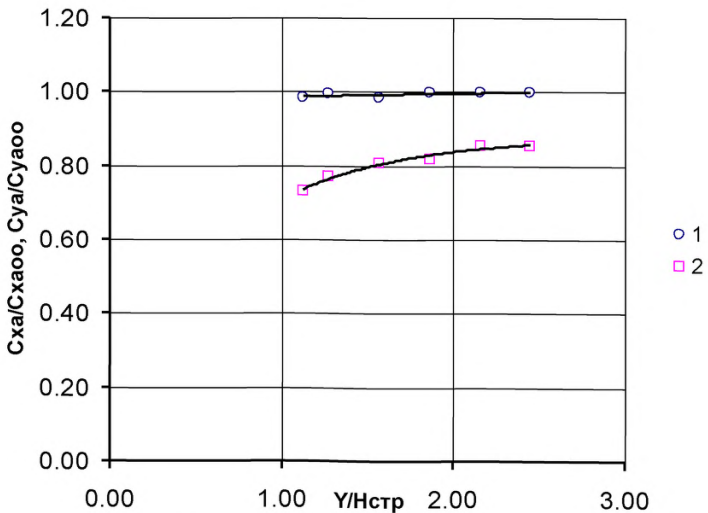


Рисунок Г.5 – Влияние экрана в малотурбулентном потоке:

$$1 - c_{xa}/c_{xa\infty}, 2 - c_{ya}/c_{ya\infty}.$$

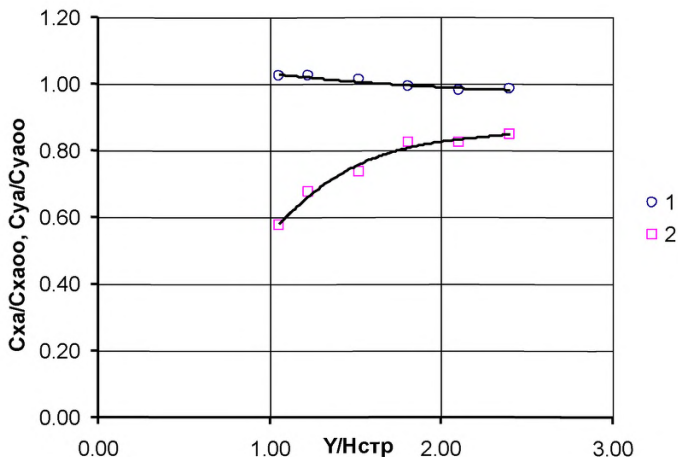


Рисунок Г.6 – Влияние экрана в турбулентном потоке
 $1 - c_{xa} / c_{xa00}$, $2 - c_{yal} / c_{yal00}$.

Таким образом, результаты экспериментов без экрана могут быть использованы для горизонтально расположенных строений, относительная высота которых над экраном $Y / H_{стр} > 2 \dots 2.5$ (в зависимости от требуемой точности).

Г.4 Численное моделирование

Основная часть расчетных исследований проводилась для сечений пролетных строений мостов уменьшенных размеров. Некоторые задачи решались и для объектов натурных размеров с целью выявить влияние числа Рейнольдса.

Использовалась математическая модель нестационарного изотермического течения несжимаемой жидкости. Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса дополнялись моделью вихревой вязкости (URANS-подход), как правило, SST k- ω моделью турбулентности [Г12]. Для некоторых вариантов поперечных сечений проводились расчеты в рамках моделирования отсоединенных вихрей DES [Г13].

Прямоугольная расчетная область имела протяженность $(30 \div 40)H$ в продольном и $(14 \div 20)H$ в поперечном направлении. Передняя грань обтекаемого тела отстояла от входной границы на расстояние $(8 \div 12)H$. Здесь H – поперечный размер сечения без учета ограждений.

На границах области выставлялись краевые условия:

прилипания на стенках $\vec{V} = 0$ для поля скоростей $\vec{V}(x, y, t)$;

входные $\vec{V} = \vec{V}_\infty$, $\varepsilon = \varepsilon_\infty$, $l_T = l_{T\infty}$;

выходные $p = p_{\text{атм}}$;

условия симметрии на верхней и нижней границах.

Здесь p – статическое давление, l_T – масштаб турбулентности. Величины ε_∞ и $l_{T\infty}$ задавались таким образом, чтобы воспроизвести параметры турбулентного потока в аэродинамической трубе в окрестности модели.

В расчетах обтекания моделей пролетных строений использовались конечнообъемные «низкорейнольдсовы» (безразмерное расстояние первого узла до стенки $y^+ \leq 3 \dots 4$) многоблочные расчетные сетки, позволяющие рассчитывать отрыв и присоединение пограничного слоя. Внутренний, охватывающий тело, блок состоял из четырехугольных элементов, сгущавшихся к поверхности тела и геометрическим особенностям. Непосредственно у стенки создавался сеточный слой со структурированной ортогональной четырехугольной сеткой. Область следа покрывалась сеткой из квадратных ячеек, каждая размером не более $H/12 \dots H/10$. К внешним границам размер ячеек возрастал до $H/4 \dots H/3$. На периметр обтекаемого контура в зависимости от его формы приходилось порядка $10^2 \dots 10^3$ ячеек. Общее количество ячеек варьировалось от 100...120 тысяч (для простых форм сечений) до 250...300 тысяч (для сложных).

Расчетные сетки для натуральных объектов имели меньшую плотность узлов у стенки ($y^+ = 30 \dots 1000$ в большинстве пристеночных ячеек). В этом случае пограничный слой описывался с помощью пристеночных функций.

Трехмерные сетки для DES строились «вытягиванием» соответствующих плоских сеток в направлении оси z на расстояние $l_z = 4...6H$.

Пример расчетной сетки возле балки трапецевидного сечения с перекрытием и ограждениями приведен на рисунке Г.7.

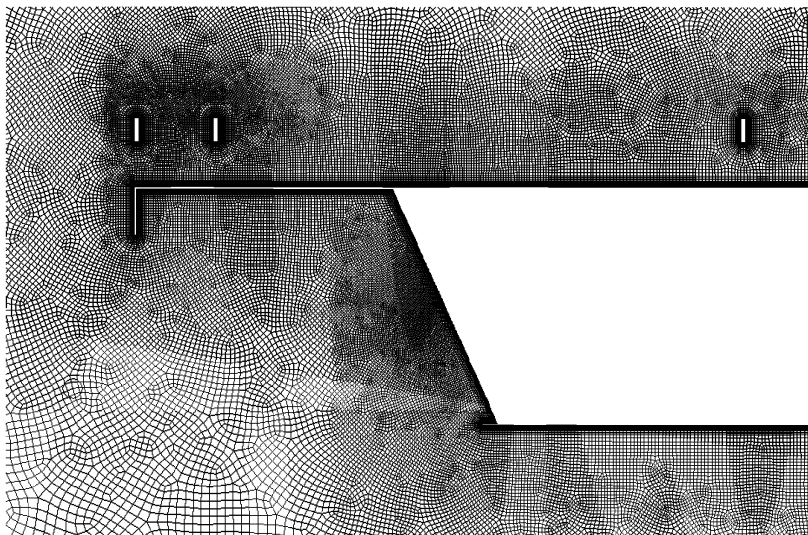


Рисунок Г.7 – Пример расчетной сетки (фрагмент).

Для отдельных вариантов поперечных сечений проводилась оценка влияния сетки на результаты.

При решении уравнений Навье-Стокса связь скорость-давление реализовывалась с помощью алгоритма SIMPLE [Г14].

Конвективные и вязкостные члены уравнений движения жидкости и переноса турбулентных параметров аппроксимировались схемами второго порядка точности.

Интегрирование по времени осуществлялось неявной схемой 2-го порядка точности. Шаг интегрирования Δt составлял $(0.02...0.04)H/V_\infty$, т.е. при сходе вихрей с безразмерной частотой $Sh = f_a H/V_\infty = 0.1$ Δt был

приблизительно в 500...250 раз меньше периода $1/f_a$, что обеспечивало приемлемое разрешение нестационарных параметров потока. Установившаяся вихревая дорожка обычно формировалась к моменту времени $(60...120)H/V_\infty$. Для сбора нестационарной статистики использовался отрезок времени, не меньший 5 периодов. Общее число шагов интегрирования составляло в среднем 8000...15000.

Приведем примеры решения некоторых тестовых задач.

В таблице Г.2 и на рисунке Г.8 представлены расчетные данные по аэродинамическим характеристикам балки с квадратным поперечным сечением в сравнении с данными других авторов. В таблице обозначено: α – угол атаки, c'_{xa} и c'_{ya} – коэффициенты пульсационных составляющих лобового сопротивления и подъемной силы.

Таблица Г.2 – Аэродинамические характеристики балки квадратного сечения ($\alpha = 0^\circ$).

Источник	$Re \cdot 10^3$	ε , %	c_{xa}	c'_{xa}	c'_{ya}	Sh
расчет (URANS)	37.6	0.5	2.12	0.163	1.55	0.119
[Г6]	68.9	0.2	2.16	0.207	1.180	0.131
[Г7]	32	0.4	2.30	-	-	-
[Г8]	176	<2	2.04	0.23	1.23	0.122
[Г9]	100	<2	2.05	0.17	1.32	0.118
[Г15]	22	-	2.25	0.20	1.50	0.130

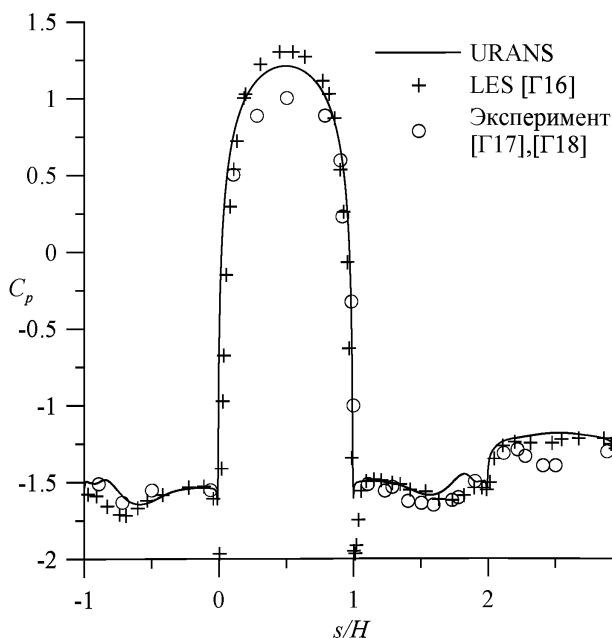


Рисунок Г.8 – Распределение коэффициента осредненного давления по периметру балки квадратного сечения.

Влияние на аэродинамические характеристики числа Рейнольдса и относительной ширины сечения B/H исследовалось для балок прямоугольного сечения. Сравнение расчетных и опытных данных проведено на рисунках Г.9 и Г.10. Отметим близость результатов по коэффициенту сопротивления балки «низкорейнольдсовых» ($Re = 0.3 \cdot 10^5$) и «высокорейнольдсовых» ($Re = 43 \cdot 10^5$) расчетов при $B/H > 1$. Точность предсказания c_{xa} падает для относительно узких ($B/H < 1$) и широких ($B/H > 3$) сечений. В то же время, лучшее соответствие с экспериментом по числу Струхала демонстрируют расчеты обтекания сечений уменьшенных размеров ($Re = 0.3 \cdot 10^5$).

Таким образом, показана применимость в численных аэродинамических исследованиях сечений пролетных строений мостов уменьшенных размеров.

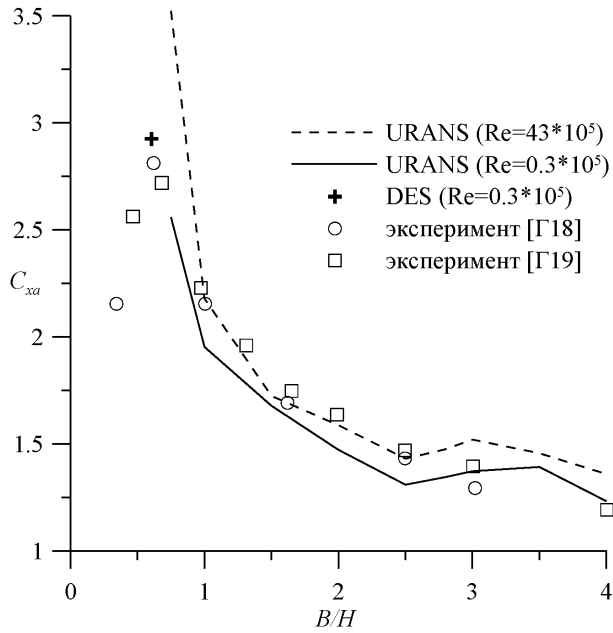


Рисунок Г.9 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления от относительной ширины балки.

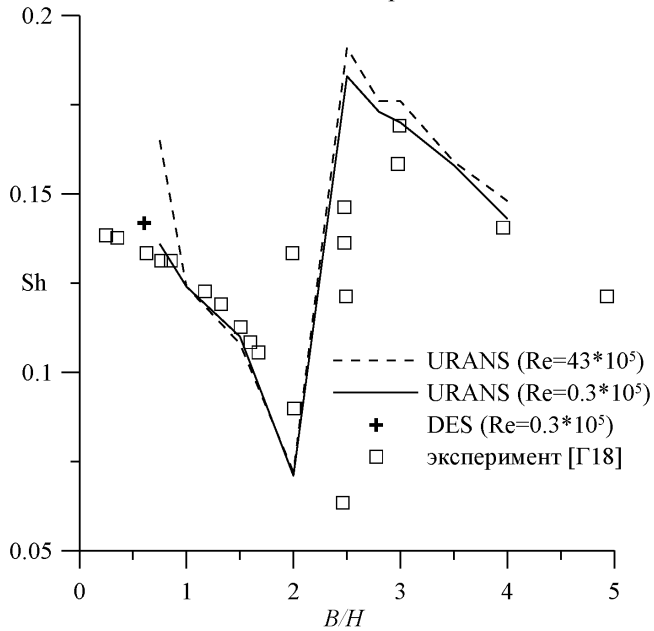


Рисунок Г.10 – Зависимость числа Струхала от относительной ширины балки.

Для большинства исследованных в работе поперечных сечений результаты расчетов по описанной методике в диапазоне углов атаки $-5^\circ \dots 5^\circ$ удовлетворительно, в пределах 10-20%, соотносились с результатами продувок в аэродинамической трубе и использовались в качестве подтверждающих материалов. В Приложениях А, Б и В представлены результаты физических экспериментов.

БИБЛИОГРАФИЯ к Приложению Г

- [Г1] Девнин С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций. – Л.: Судостроение, 1983. – 331 с.
- [Г2] Федяевский К.К., Блюмина Л.Х. Силы вихревой природы, действующие на вынуждено колеблющийся цилиндр // Тр. конф. по аэродинамике и аэроупругости высоких строит. сооружений. – М., 1974.
- [Г3] Davenport, A.G. Gust Loading Factors / A.G. Davenport // J. of the Structural Division: Proc. ASCE. – 1967.
- [Г4] Spectral characteristics of surface-layer turbulence / J.C. Kaimal, J.C. Wyngaard, Y. Izumi, and O.R. Cote // Q.J.R. Meteorol. Soc. – 1972. – Vol. 98. – 563-598 p.
- [Г5] Колмогоров, А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса / А.Н. Колмогоров // ДАН СССР. – 1941. – Т.30. – №4.
- [Г6] Noda H., Nakayama A. Free-stream turbulence effects on the instantaneous pressure and forces on cylinders of rectangular cross section / H. Noda // Experiments in Fluids. – 2003. – Vol. 34, N 3. – P. 332-344.
- [Г7] Igarashi T. Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod / T. Igarashi // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1997. Vol. 69-71. – P. 141-153.

- [Г8] Lee B.E. The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism / B.E. Lee // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1975. – Vol. 69. – P. 263-282.
- [Г9] Vickery B.J. Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream / B.J. Vickery // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1966. – Vol. 25. – P. 481-494.
- [Г10] СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. – М.: Госстрой СССР, 1986. – 32 с. (актуализированная редакция в виде СП 20.13330.2011).
- [Г11] Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General actions. Wind actions. EN 1991-1-4:2005 / European Standard. – Brussels, 2005.
- [Г12] F.R. Menter. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8):1598-1605, August 1994.
- [Г13] Spalart, P.R., Jou, W.-H., Strelets, M., Allmaras, S.R., 1997. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. In: Liu, C., Liu, Z. (Eds.), *Advances in LES/DNS*, First AFOSR International Conference on DNS/LES. Greyden Press, Louisiana Tech University.
- [Г14] Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т 2 / К. Флетчер; пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
- [Г15] Sohankar A., Davidson L., Norberg C. Large Eddy Simulation of Flow Past a Square Cylinder: Comparison of Different Subgrid Scale Models / A. Sohankar // *Journal of Fluids Engineering*. – 2000. – Vol. 122. –P. 39-47.
- [Г16] 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://etheses.nottingham.ac.uk/125/>.
- [Г17] Bearman P, Obasaju E, An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square section cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, Vol.119, p. 297-321.

- [Г18] Norberg C, Flow around rectangular cylinders: Pressure forces and wake frequencies, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, Vol.49, p. 187-196.
- [Г19] Igarashi T, Fluid flow and heat transfer around rectangular cylinders, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, Vol.30, p. 893-901.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. – М.: Госстрой СССР, 1986. – 32 с. (актуализированная редакция в виде СП 20.13330.2011).
- [2] СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы. – М.: ГП ЦПП, 1996. – 214 с. (актуализированная редакция в виде СП 35.13330.2011).
- [3] Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General actions. Wind actions. EN 1991-1-4:2005 / European Standard. – Brussels, 2005.
- [4] American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures. ANSI/ASCE 7-98, ASCE, New York, 2000.
- [5] Air Recommendations for Loads on Buildings. Chapter 6. Wind Loads. Architectural Institute of Japan, 2004.
- [6] Standard Australia. Minimum design loads on structures. Part 2: Wind Loads. Standards Australia. North Sydney, 1989.
- [7] Фомин Г.М. Исследование автоколебаний упругих конструкций при срыве потока: Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1974. – 341 с.
- [8] Беспрозванная, И.М. Воздействие ветра на высокие сплошнотенчатые сооружения / И.М. Беспрозванная, А.Г. Соколов, Г.М. Фомин. – М.: Стройиздат, 1976. – 183 с.
- [9] Барштейн М.Ф. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / М.Ф. Барштейн. – М.: Стройиздат, 1978. – 216 с.
- [10] Девнин, С.И. Аэрогидромеханика плохобтекаемых конструкций / С.И. Девнин. – Л.: Судостроение, 1983. – 331 с.
- [11] Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан; пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецово; под. ред. Б.Е. Маслова. – М.: Стройиздат, 1984. – 360 с.
- [12] Динамический расчет зданий и сооружений: справочник проектировщика / М.Ф. Барштейн и др.; под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.
- [13] Казакевич, М.И. Аэродинамика мостов / М.И. Казакевич. – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.

- [14] Аэродинамические испытания в процессе надвижки мостов / С.Д. Саленко, А.А. Кураев, А.Д. Обуховский и др. // Трансп. стр-во. – М., 1996. – № 1–2. – С. 40–41.
- [15] Обеспечение аэроупругой устойчивости металлических балочных пролетных строений во время монтажа при воздействии на них ветра / В.И. Шмидт, П.П. Куракин, В.Н. Коротин и др. // Вестник мостостроения. – М., 1998. – № 2. – С. 13–20.
- [16] Попов, Н.А. Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки / Н.А. Попов. – М.: Госстрой России, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2000. – 45с.
- [17] Комаров, М.С. Исследование аэроупругой устойчивости пролетных строений металлических балочных и вантовых мостов на стадии монтажа / М.С. Комаров, В.В. Назаренко, К.С. Стрелков // Труды ЦАГИ. – 2001. – Вып. 2642. – С. 205–208.
- [18] Саленко, С.Д. Нестационарная аэродинамика плохообтекаемых многобалочных конструкций: дис. ... д-ра. техн. наук: 01.02.05; защищена 21.10.05 / С.Д. Саленко. – Новосибирск, 2005. – 332 с.
- [19] Саленко, С.Д. Особенности нестационарных аэродинамических характеристик многобалочных конструкций / С.Д. Саленко // Науч. вестн. НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – № 3(18). – С. 131–142.
- [20] Саленко, С.Д. Методика расчета аэроупругих колебаний многобалочных сооружений / С.Д. Саленко // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – № 5. – С. 161–167.
- [21] Бисплингхоф Р.Л., Эшли Х., Халфмэн Р.Л. Аэроупругость. – М.: ИЛ, 1958. – 799 с.
- [22] Фершинг Г.В. Основы аэроупругости. – М.: Машиностроение, 1984. – 654 с.

- [23] Проектирование городских мостовых сооружений. МГСН 5.02-99. Приняты и введены в действие постановлением Правительства Москвы от 7 сентября 1999 г. № 848.
- [24] Айрапетов, А.Б. Критерий галопирования высоких сооружений в ветровом потоке / А.Б. Айрапетов // Труды ЦАГИ. Сборник статей по аэродинамике малых скоростей и промышленной аэродинамике. – М., 2003. – Вып. 2643. – С. 85-91.
- [25] Blevins, R.D. Flow-induced vibration / R.D. Blevins. – 2-e Edition. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. – 451 p.

ОКС 93.040

Ключевые слова: воздействие ветра, пролетное строение моста, ветровая нагрузка, аэродинамические коэффициенты, дивергенция, вихревое возбуждение колебаний, галопирование, флаттер.

Руководитель организации-разработчика
НГТУ

наименование организации

Ректор

Н.В. Пустовой

должность

личная подпись

инициалы, фамилия