ОДМ 218.2.040–2014

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

# МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЙ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
(РОСАВТОДОР)

МОСКВА 2014

gost.e-ecolog.ru

## 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 Струхаля 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 Струхаля.

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 надвижки 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 Струхаля 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 Струхаля.

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; $B_б$ – ширина балки; $L_1$ – межбалочное расстояние; $L_р$ – длина ребра; $\delta$ – длина карниза; $H_г$ и $H_щ$ – полная высота и высота щита ограждений.

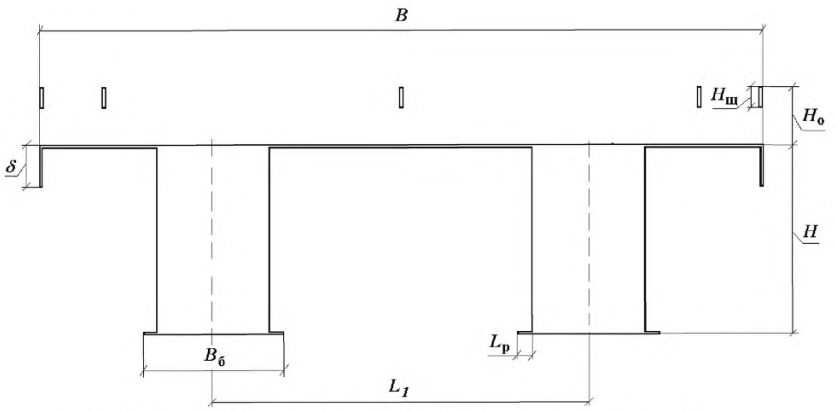



Рисунок 1 – Геометрические параметры типового сечения.

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

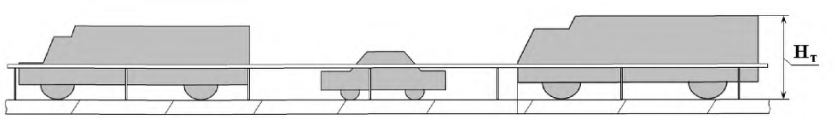



Рисунок 2 – Схема размещения автотранспортных средств на проезжей части.

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

## 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).

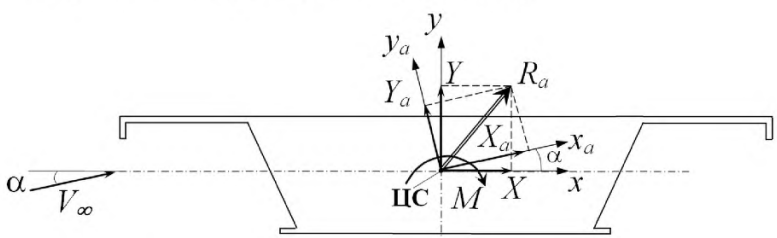



Рисунок 3 – Схема действия аэродинамических сил и момента.

Аэродинамические коэффициенты сечений в данных рекомендациях определяются следующим образом:

коэффициент лобового сопротивления

$$c_{xa} = \frac{X_a}{qS_{\hat{o}\eth}},$$

коэффициент подъемной силы

$$c_{ya} = \frac{Y_a}{qS_{\ddot{i}\ddot{e}}},$$

коэффициент момента

$$c_m = \frac{M}{qS_{\ddot{i}\ddot{e}}B}.$$

Здесь

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

$S_{\hat{o}\eth} = H \cdot l$ – характерная площадь строения при определении $c_{xa}$ (площадь фронтальной проекции строения), $S_{\ddot{i}\ddot{e}}$ – характерная площадь строения при определении $c_{ya}$ и $c_m$ (площадь проекции строения в плане: для сечений однобалочных строений и строений с перекрытием $S_{\ddot{i}\ddot{e}} = B \cdot l$, для неперекрытых пролетных строений из $n$ балок шириной $B_{\acute{a}}$ каждая $S_{\ddot{i}\ddot{e}} = n \cdot B_{\acute{a}} \cdot l$);

$H$ – 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 $\alpha$ при $\alpha = 0$.

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

$$A = \left( c_{xa} \cdot S_{\text{ðð}} / S_{\text{ïë}} + c_{ya}^{\alpha} \right)\Big|_{\alpha=0}.$$

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

Для представления избыточного статического давления $\Delta p$ на поверхности пролетного строения используется безразмерный коэффициент давления $c_P$:

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

где $p_\infty$ – статическое давление набегающего потока.

Число Струхаля сечения:

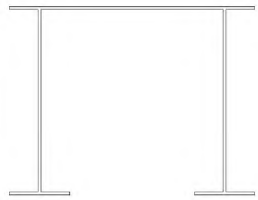
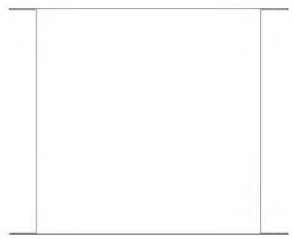
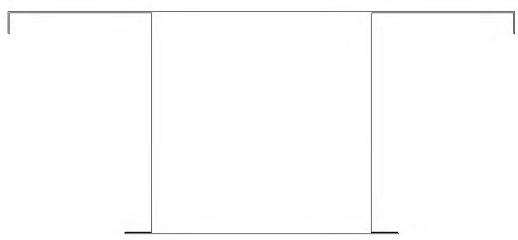
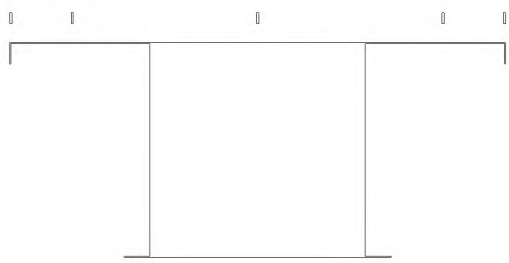
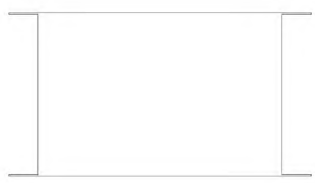
$$Sh = \frac{f_a H}{V_\infty},$$

где $f_a$ – частота схода вихрей.

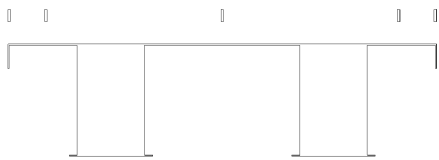
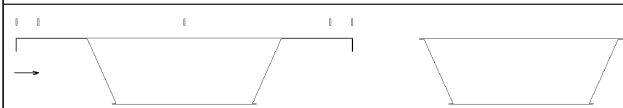
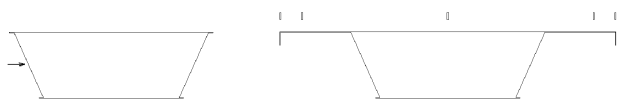
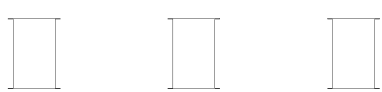
Описание типовых сечений пролетных строений мостов и ссылки на диаграммы их аэродинамических характеристик из Приложения А приведены в таблице 1.

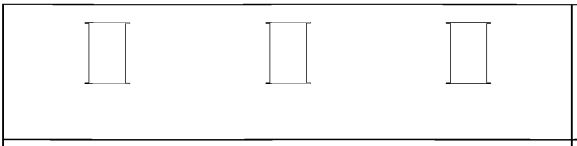
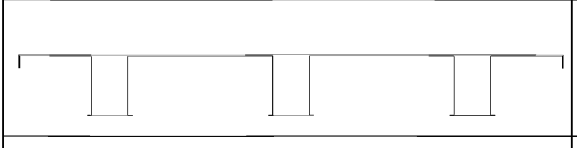
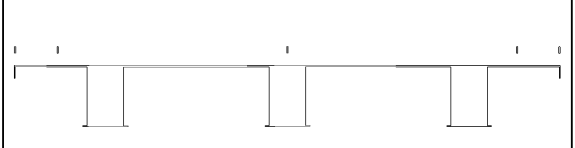
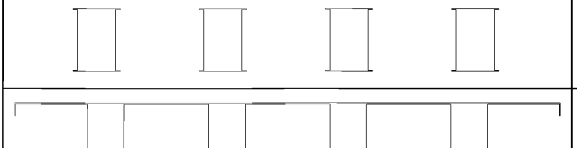
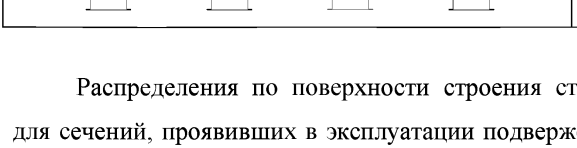
Таблица 1 – Типовые поперечные сечения и их геометрические параметры.

| Форма сечения | Относительные размеры | Диаграмма Приложения А |
|---|---|---|
| Однобалочные строения | | |
|  | $B / H = 0.75$<br>$B_{\text{â}} / H = 0.75$<br>$L_{\text{ð}} / H = 0.0727$ | 1-1 |

| | | |
|---|---|---|
|  | $B/H=1.3$<br>$B_á/H=1.3$<br>$L_ð/H=0.152$ | 2-1 |
|  | $B/H=1.24$<br>$B_á/H=1.24$<br>$L_ð/H=0.121$ | 3-1 |
|  | $B/H=2.3$<br>$B_á/H=1.24$<br>$L_ð/H=0.121$<br>$\delta/H=0.1$ | 3-2 |
|  | $B/H=2.3$<br>$B_á/H=1.24$<br>$L_ð/H=0.121$<br>$\delta/H=0.1$<br>$H_í/H=0.142$ | 3-3, 3-4 |
|  | $B/H=1.85$<br>$B_á/H=1.85$<br>$L_ð/H=0.179$ | 4-1 |

| | | |
|---|---|---|
|  | $B/H=3.9$<br>$B_{\text{д}}/H=1.85$<br>$L_{\text{о}}/H=0.179$<br>$\delta/H=0.193$ | 4-2 |
|  | $B/H=3.9$<br>$B_{\text{д}}/H=1.85$<br>$L_{\text{о}}/H=0.179$<br>$\delta/H=0.193$<br>$H_{\text{i}}/H=0.275$ | 4-3, 4-4 |
|  | $B/H=3.09$<br>$L_{\text{о}}/H=0.0678$ | 5-1 |
|  | $B/H=5.1$<br>$L_{\text{о}}/H=0.0678$<br>$\delta/H=0.205$ | 5-2 |
|  | $B/H=5.1$<br>$L_{\text{о}}/H=0.0678$<br>$\delta/H=0.205$<br>$H_{\text{i}}/H=0.293$ | 5-3, 5-4 |
| Двухбалочные строения | | |
|  | $B/H=2.75$<br>$L_{\text{т}}/H=2$<br>$B_{\text{д}}/H=0.75$<br>$L_{\text{о}}/H=0.0727$ | 1-2 |

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

| | | |
|---|---|---|
|  | $B/H=6.75$<br>$L_1/H=3$ | 1-7 |
|  | $B/H=9$<br>$L_1/H=3$<br>$\delta/H=0.220$ | 1-8 |
|  | $B/H=9$<br>$L_1/H=3$<br>$\delta/H=0.220$<br>$H_i/H=0.314$ | 1-9, 1-10 |
| Четырехбалочные строения<br>$B_б/H=0.75$, $L_1/H=2$, $L_о/H=0.0727$ | | |
|  | $B/H=6.75$ | 1-11 |
|  | $B/H=9$<br>$\delta/H=0.220$ | 1-12 |
|  | $B/H=9$<br>$\delta/H=0.220$<br>$H_i/H=0.314$ | 1-13, 1-14 |

Распределения по поверхности строения статического давления для сечений, проявивших в эксплуатации подверженность аэроупругим колебаниям, приведены в Приложении Б. Числа Струхаля 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 $S_{\text{ðð}}$, плановая $S_{\text{ïë}}$). 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:

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

Здесь $\alpha$ – 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.

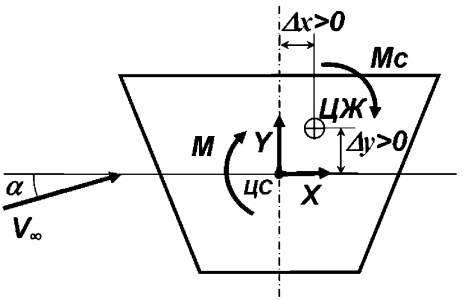



Рисунок 4 – Схема приложения аэродинамических нагрузок в сечении балки пролетного строения.

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 ($S_{\text{ïë}}$), окончательно получим коэффициент аэродинамического момента относительно ЦЖ сечения:

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

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 Струхаля 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

$k_\alpha$ – крутильная жесткость сечения;

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

$B$ – ширина поперечного сечения;

$\rho$ – плотность воздуха.

При $V_{кр1} > 2V_m$ 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:

$$V_{кр2} = \frac{Hf}{\mathrm{Sh}}.$$

Здесь

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

Sh – число Струхаля 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 Струхаля сечения $\mathrm{Sh} = 0.084 \ldots 0.089$. 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 $V_{\text{кр2}} = 13 \ldots 14$ м/с, что соответствует скорости ветра при колебаниях консоли строения с размахом около 1 м во время надвижки в пролет 1-2 в 1993 г.

При $V_{\text{кр2}} > 1.25\, V_m$ 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

$\delta$ – логарифмический декремент колебаний;

$z$ – координата вдоль рассматриваемого участка пролетного строения, $0 \le z \le l$;

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

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

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

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

$\varphi(z)$ – 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;

$\varphi_i$ – 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 $V_{\text{кр3}}$ по формуле [7, 11, 24]:

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

Здесь

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

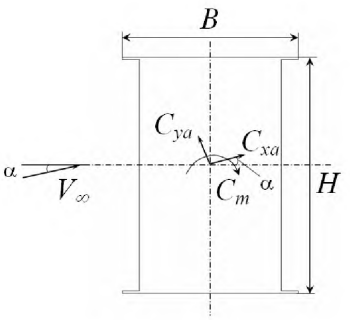
При $V_{\text{кр3}} > 1.25\,V_m$ опасность возникновения галопирования отсутствует [3].

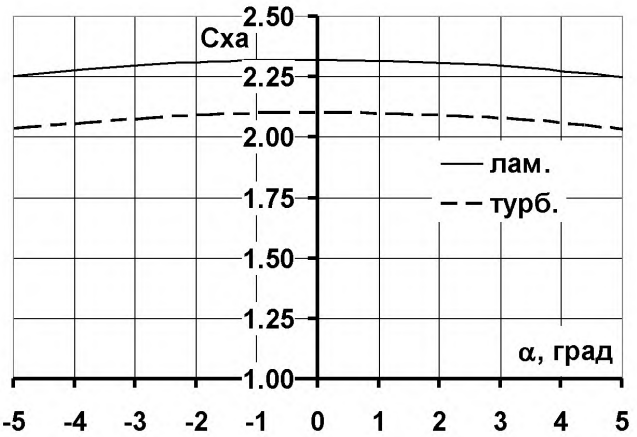
9.5 Сложность и многообразие аэромеханических явлений, сопровождающих флаттер, бафтинг и интерференцию делает рассмотрение соответствующих примеров в общем случае затруднительным. В частных случаях необходимы специальные аэродинамические исследования для конкретных конструкций.

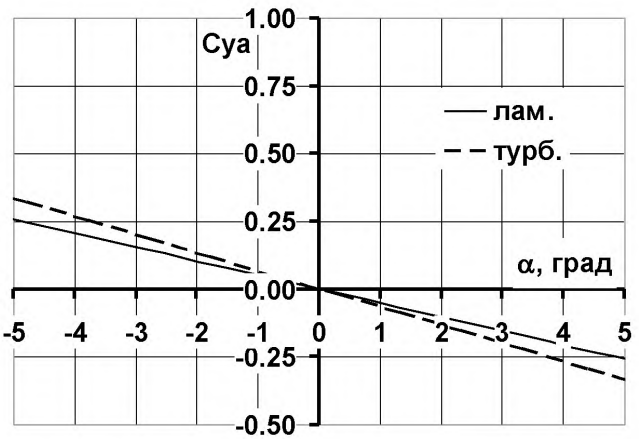
# ПРИЛОЖЕНИЕ А
# СВОДКА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЙ

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 |
|---|---|



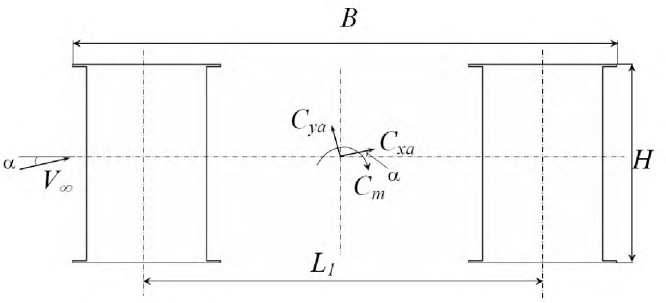



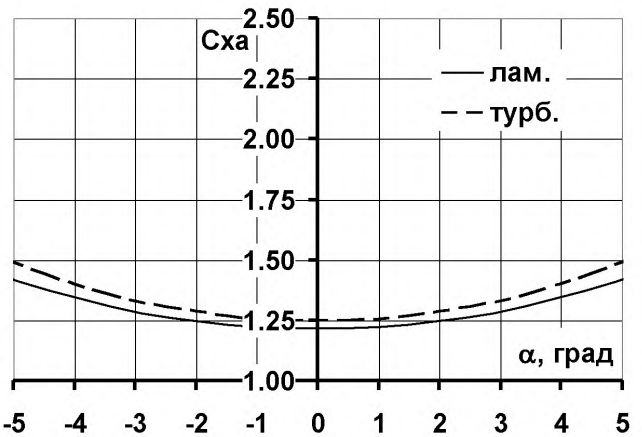



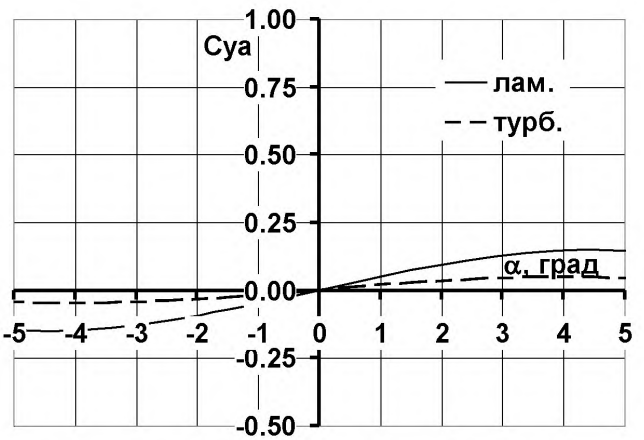

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 |
|---|---|



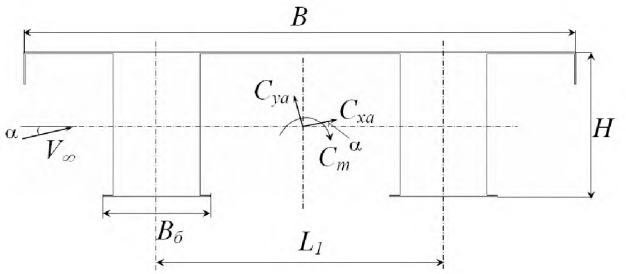



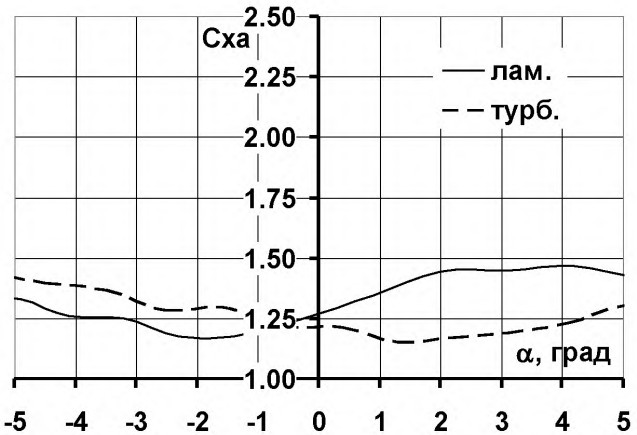



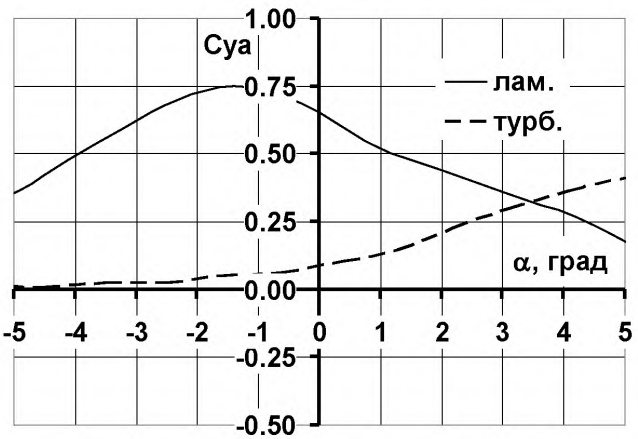

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 ($B/H=3.85$, $B_а/H=0.75$, $L_1/H=2$) | Диаграмма 1-3 |
|---|---|



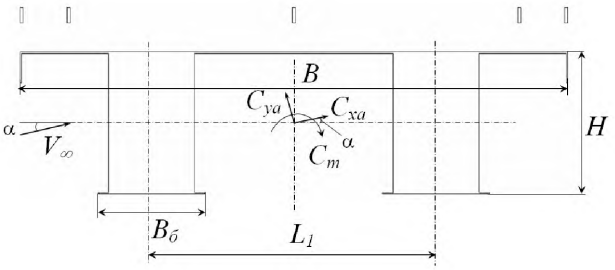



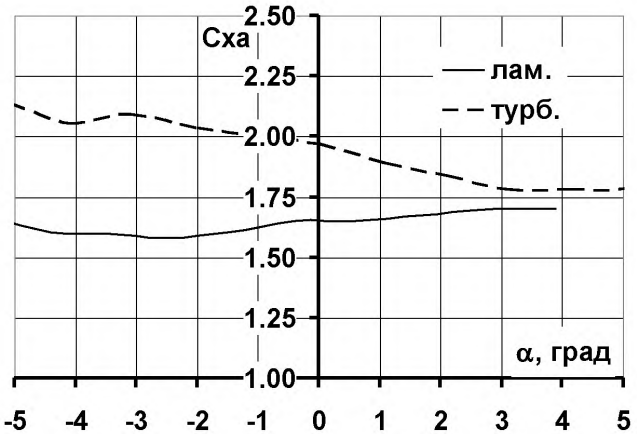



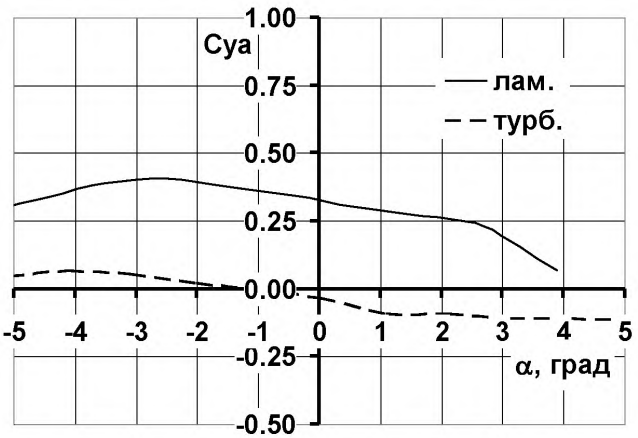

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c_{ya0}^{\alpha}$ | $c_{m0}^{\alpha}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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, $B_á$ / H = 0.75, $L_1$ / H = 2, $H_î$ / H = 0.314) | Диаграмма 1-4 |
|---|---|



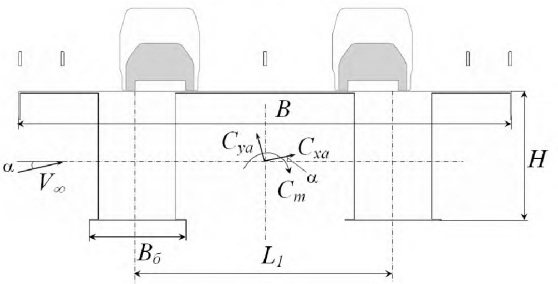



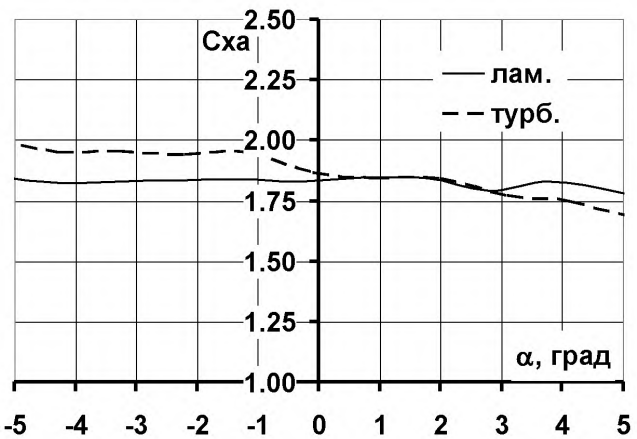



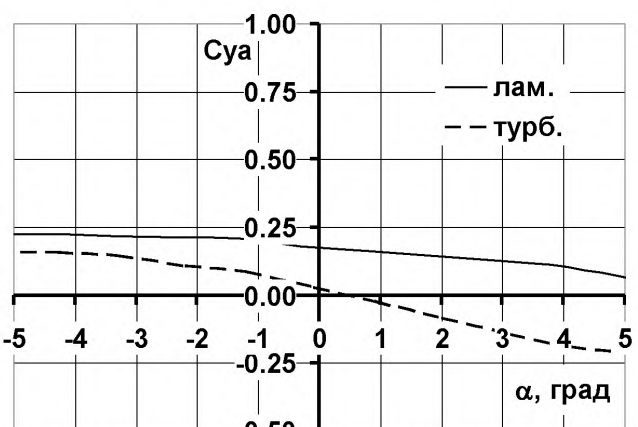

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 ($B/H=3.85$, $B_а/H=0.75$, $L_1/H=2$, $H_і/H=0.314$, $H_б/H=1.167$)** | **Диаграмма 1-5** |
|---|---|



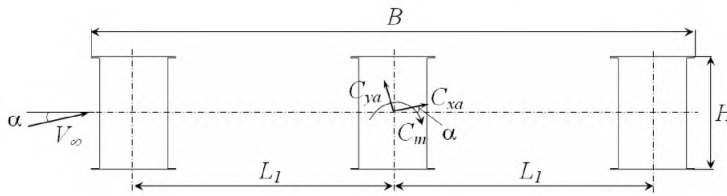



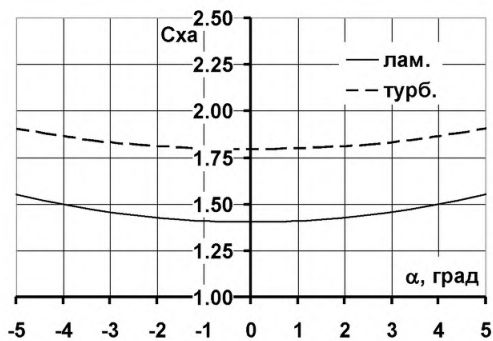



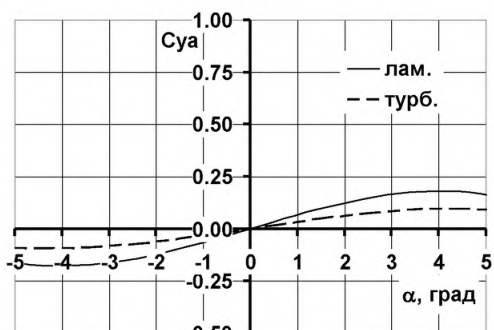

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| **поток** | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **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 |
|---|---|



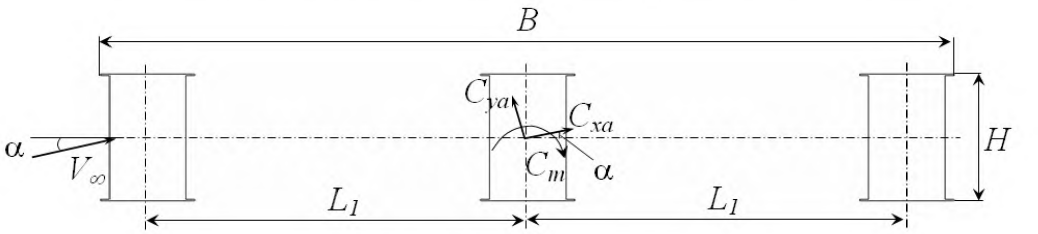



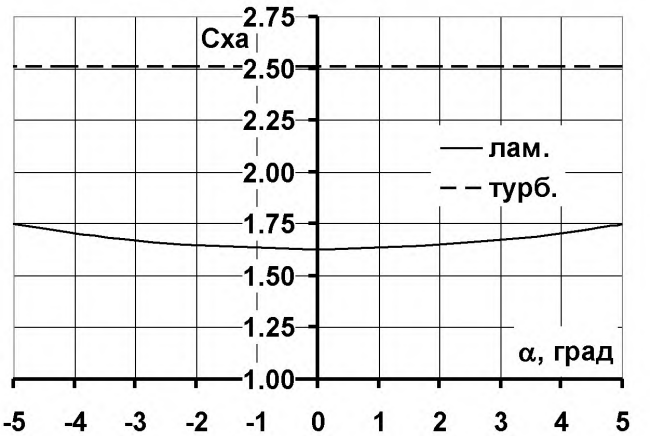



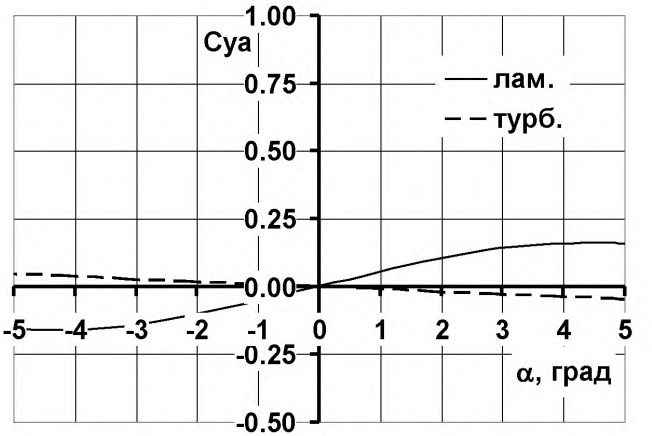

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 ($B/H=6.75$, $B_á/H=0.75$, $L_1/H=3$) | Диаграмма 1-7 |
|---|---|



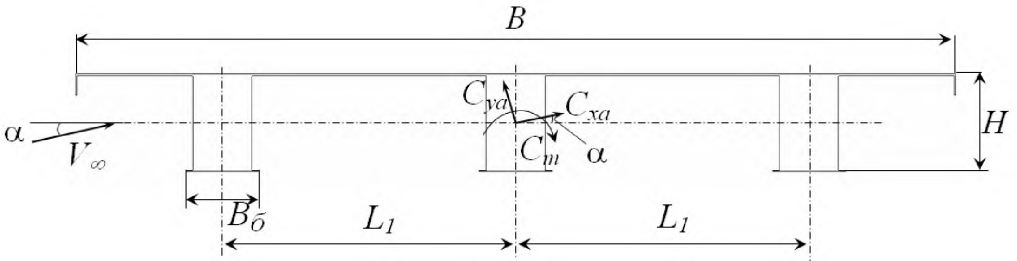



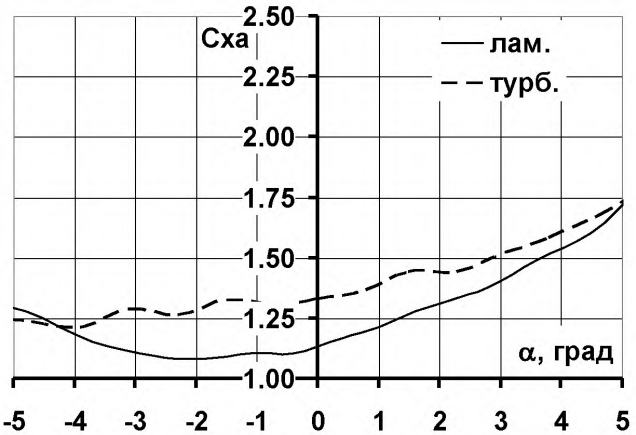



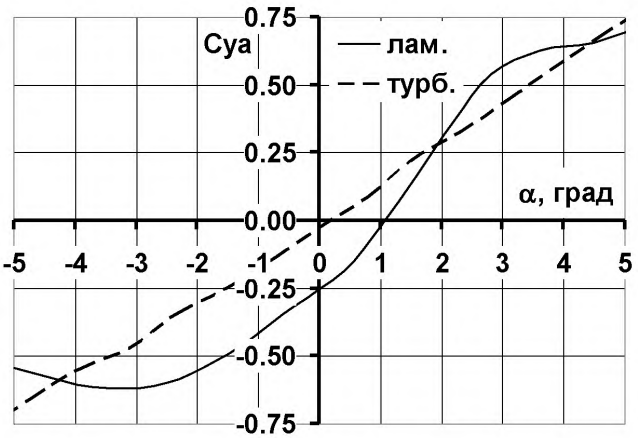

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 ($B / H = 9$, $B_б / H = 0.75$, $L_1 / H = 3$) | Диаграмма 1-8 |
|---|---|



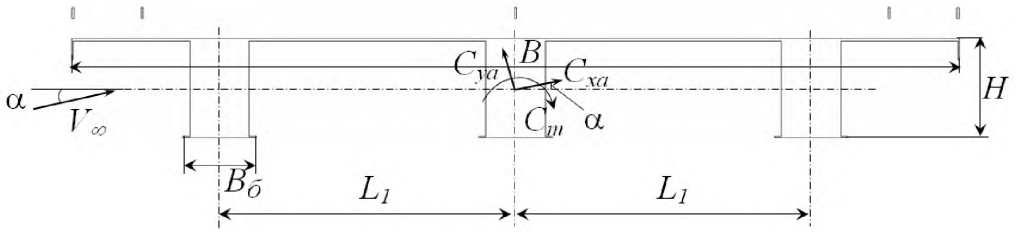



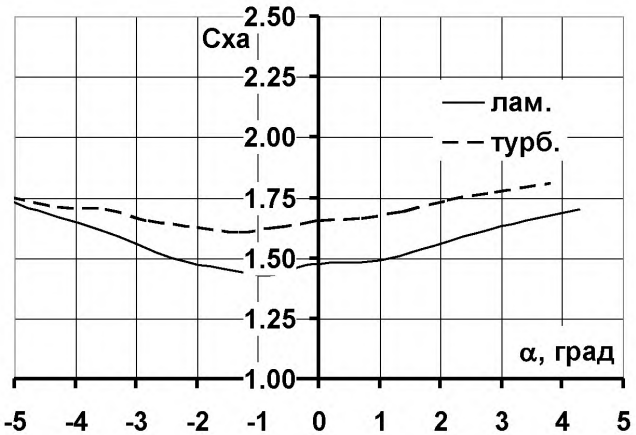



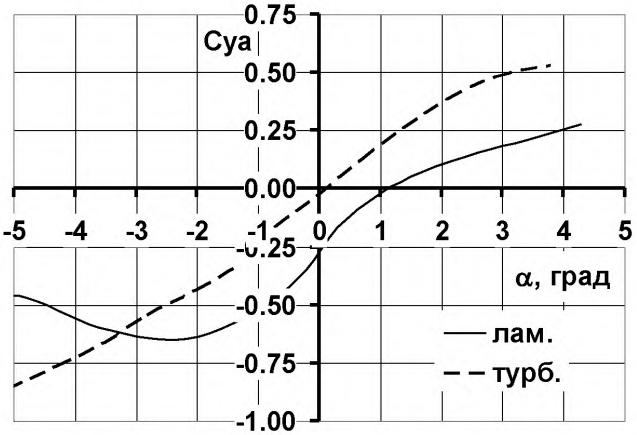

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 ($B/H=9$, $B_а/H=0.75$, $L_1/H=3$, $H_i/H=0.314$) | Диаграмма 1-9 |
|---|---|



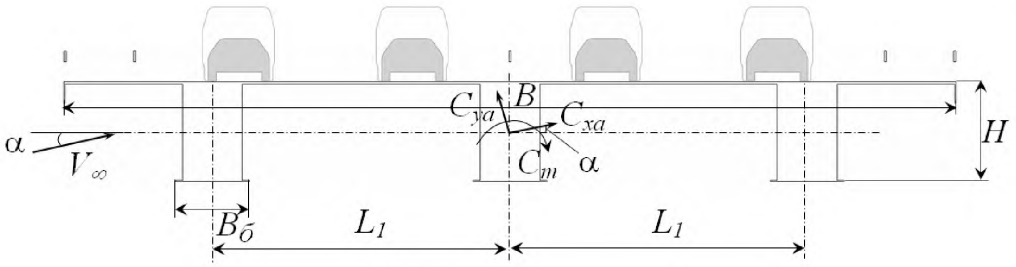



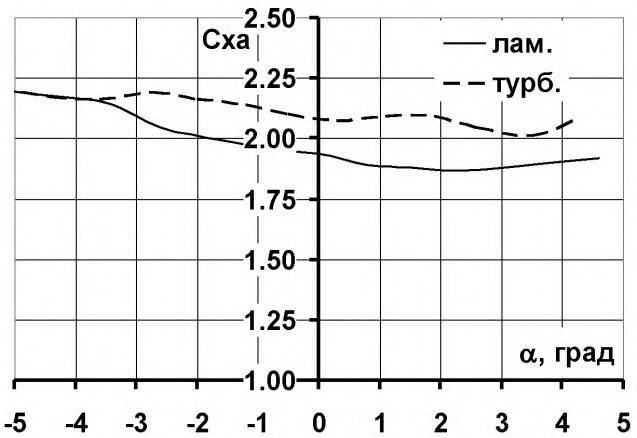



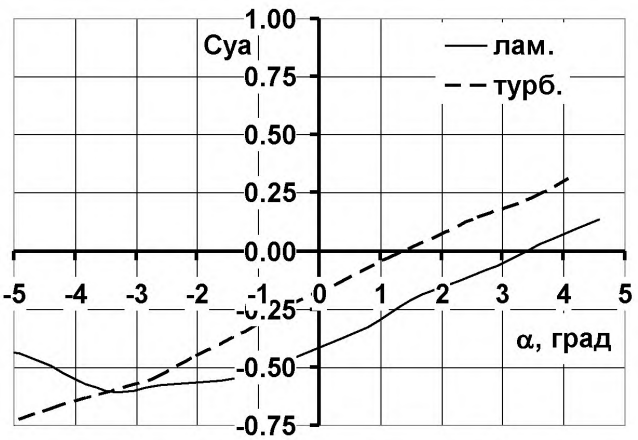

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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, $B_а$ / H = 0.75, $L_1$ / H = 3, $H_ї$ / H = 0.314, $H_ò$ / H = 1.167) | Диаграмма 1-10 |
|---|---|



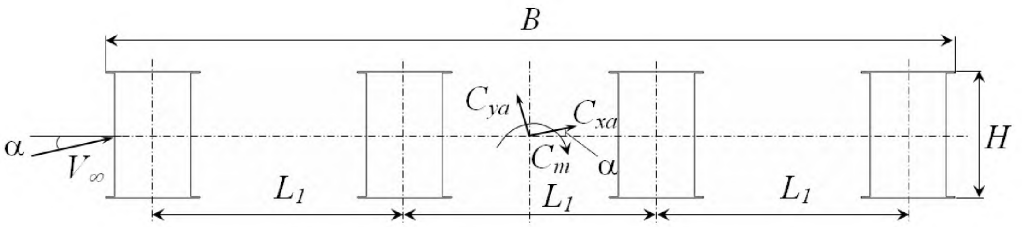



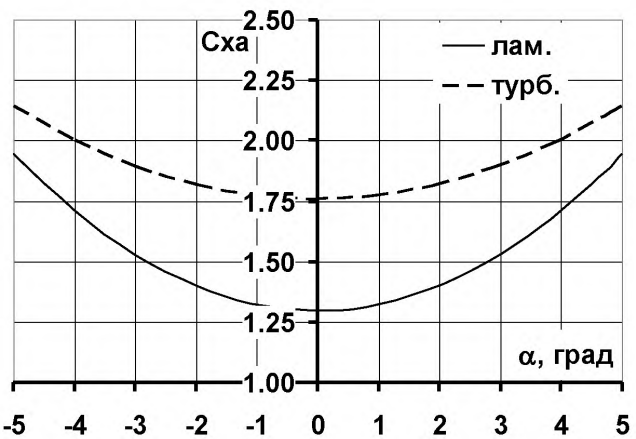



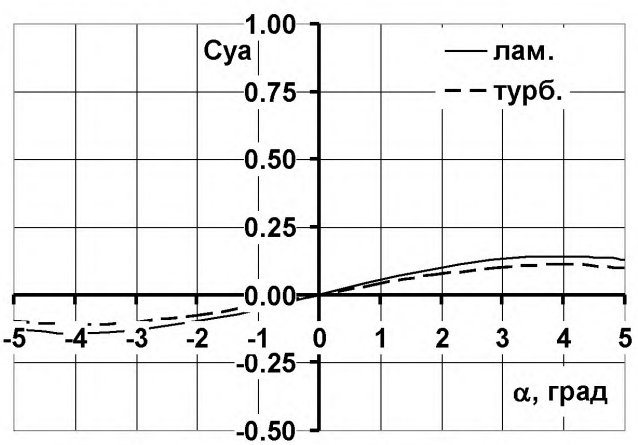

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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, $B_á$ / H = 0.75, $L_1$ / H = 2) | Диаграмма 1-11 |
|---|---|



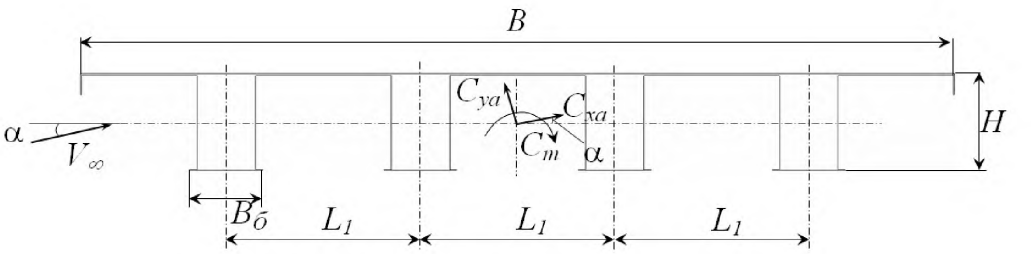



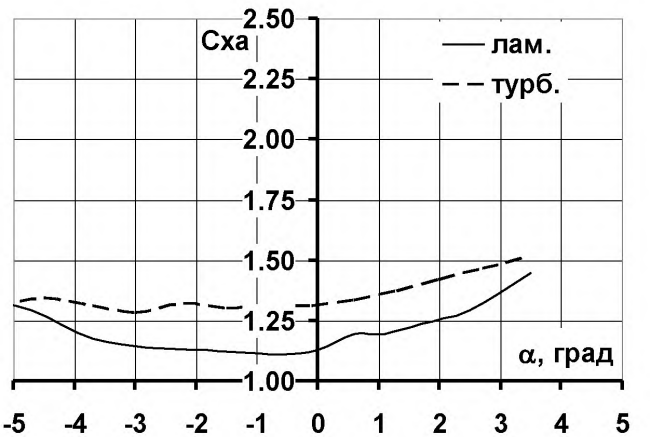



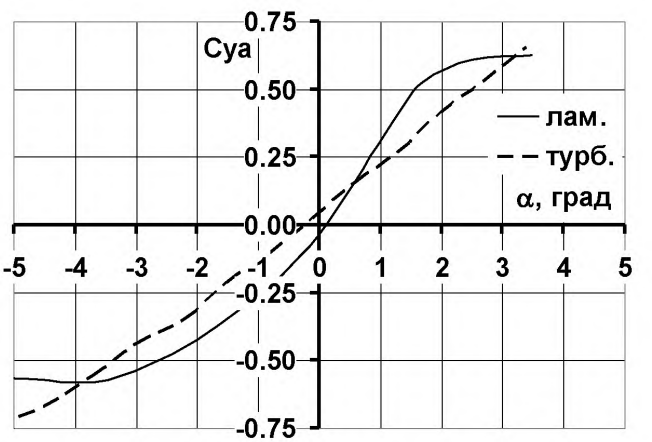

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 ($B / H = 9$, $B_б / H = 0.75$, $L_1 / H = 2$) | Диаграмма 1-12 |
|---|---|



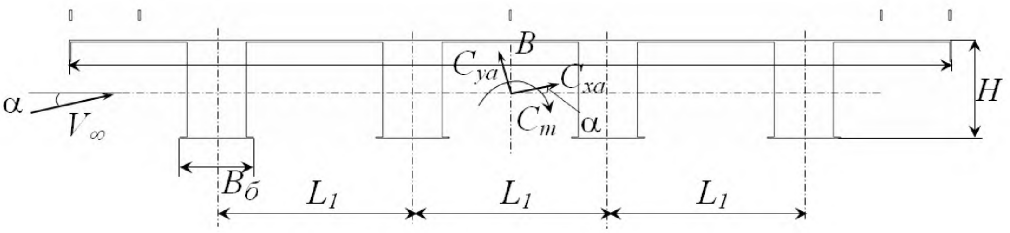



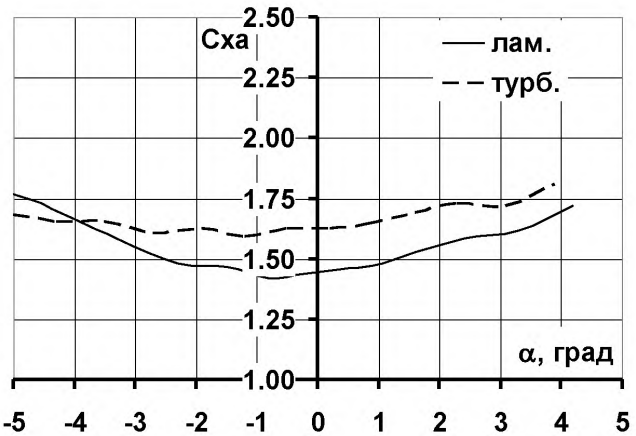



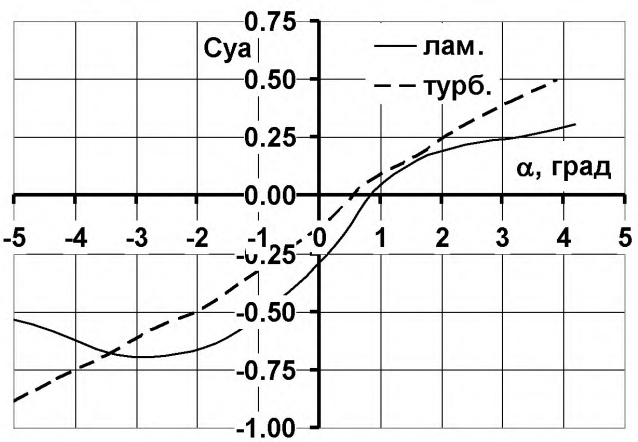

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 ($B/H=9$, $B_б/H=0.75$, $L_1/H=2$, $H_б/H=0.314$) | Диаграмма 1-13 |
|---|---|



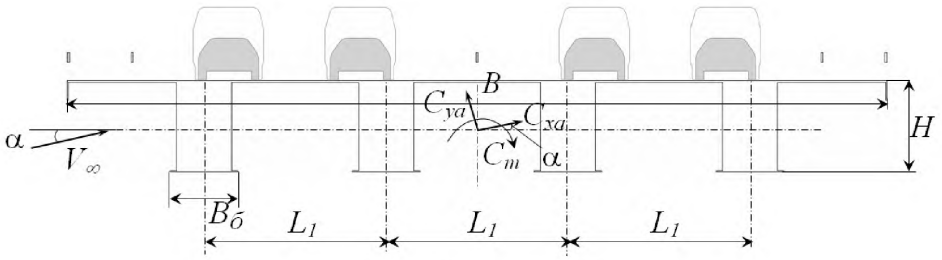



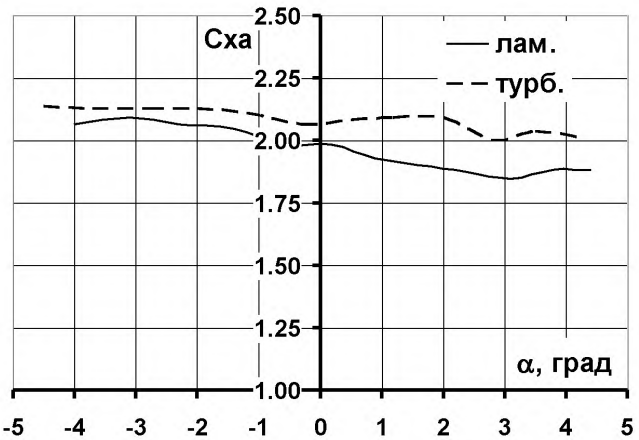



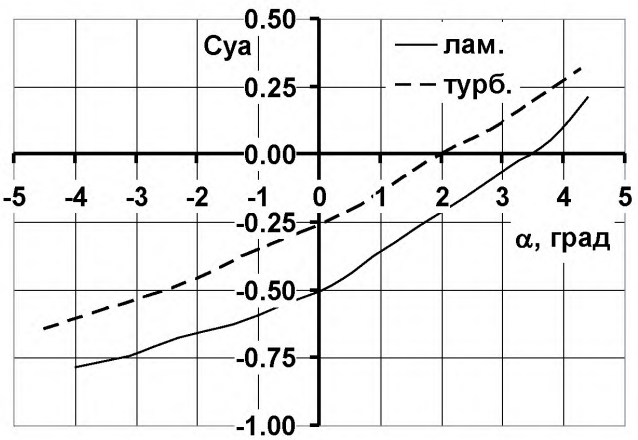

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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, $B_а$ / H = 0.75, $L_1$ / H = 2, $H_і$ / H = 0.314, $H_ò$ / H = 1.167)** | **Диаграмма 1-14** |
|---|---|



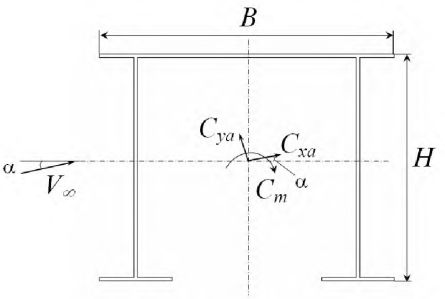



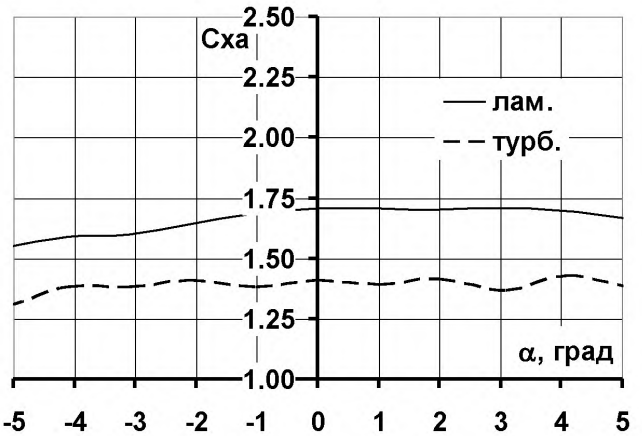



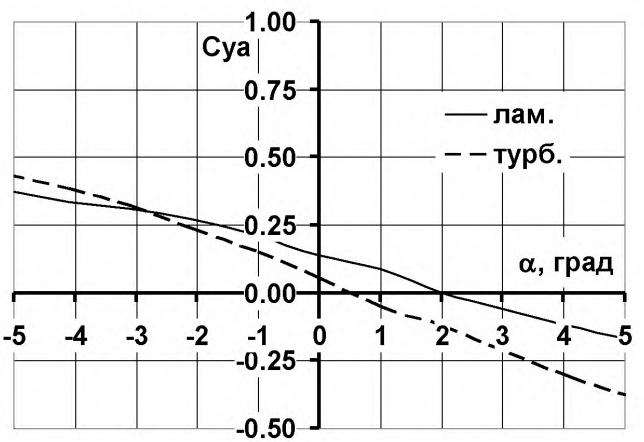

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| **поток** | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **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 |
|---|---|



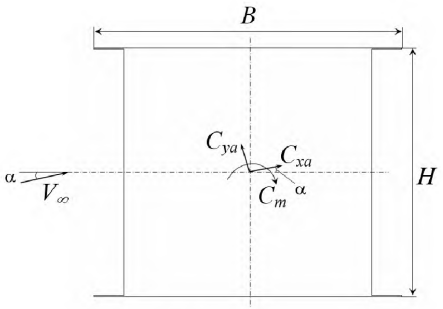



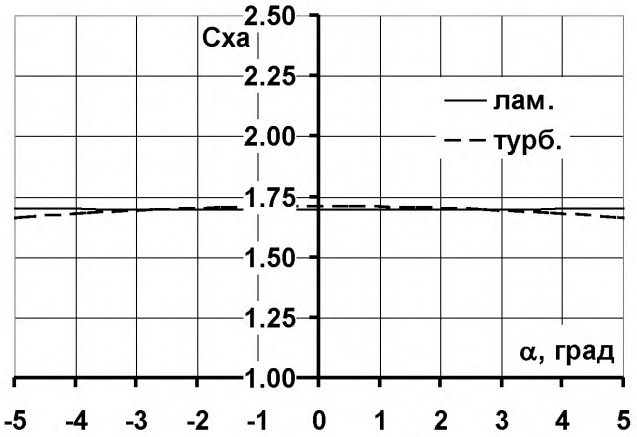



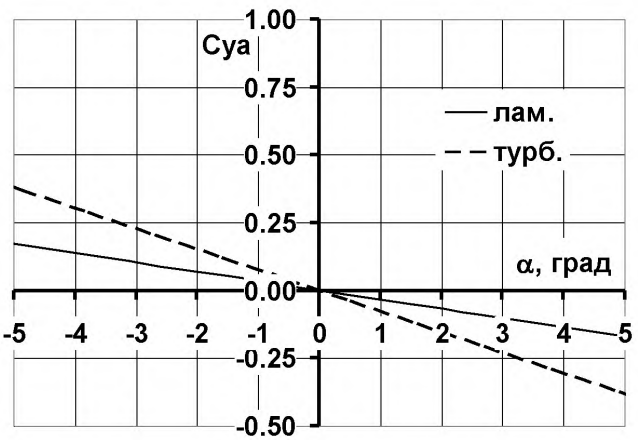

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 |
|---|---|



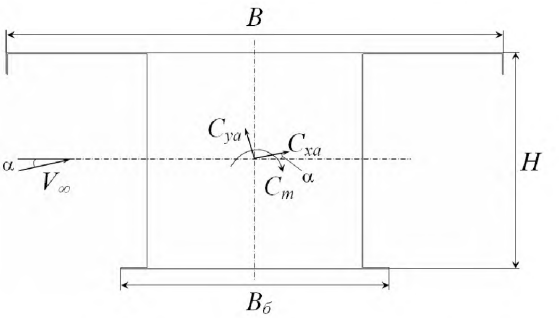



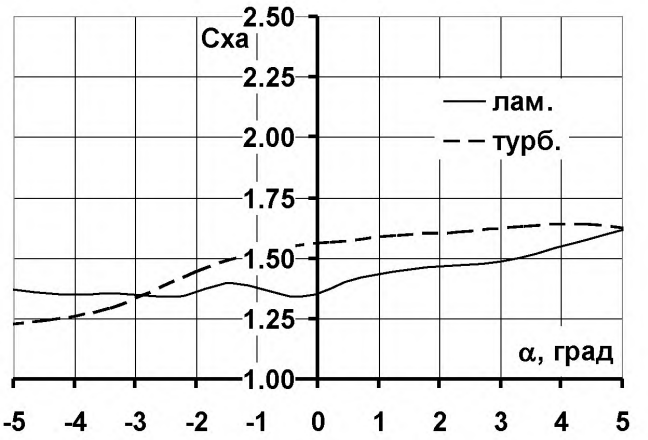



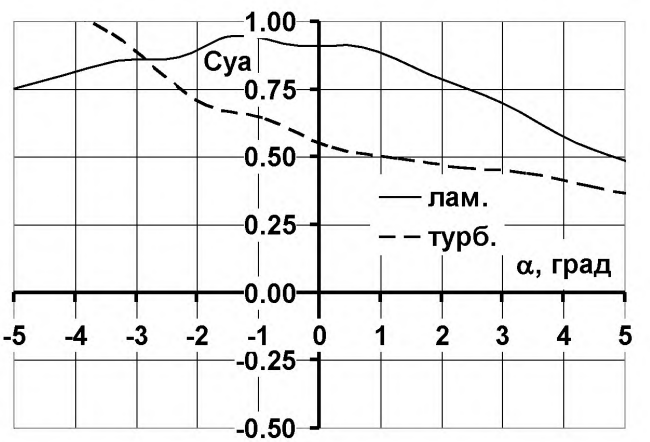

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 |
|---|---|



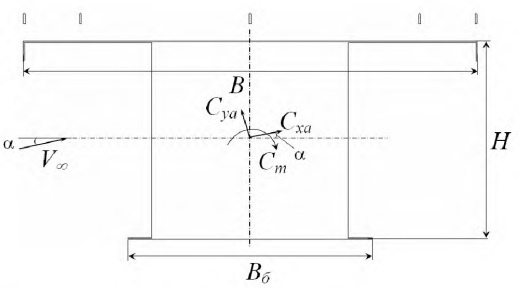



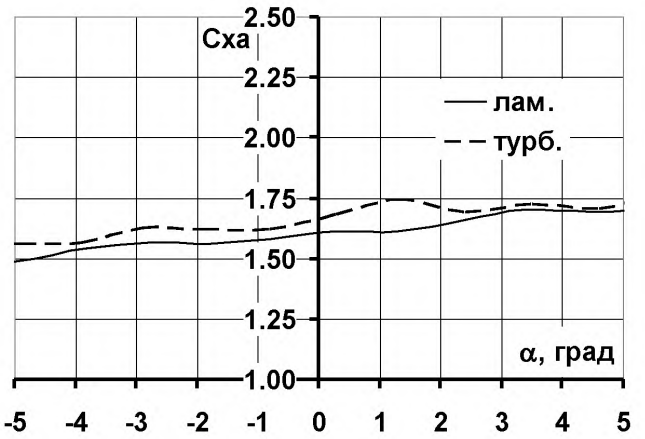



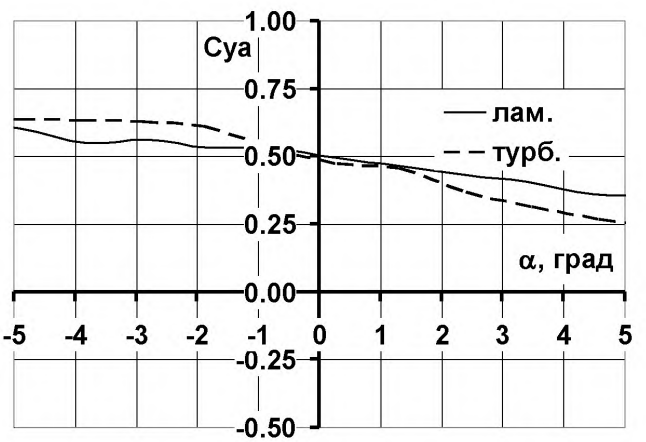

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **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 ($B/H=2.3$, $B_д/H=1.24$, $H_і/H=0.142$) | Диаграмма 3-3 |
|---|---|



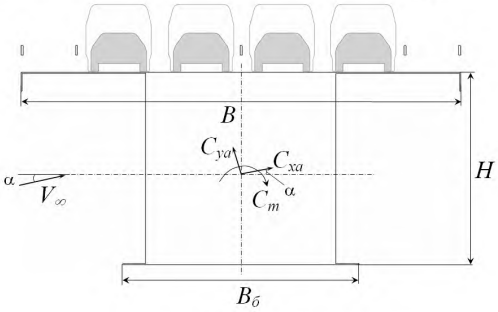



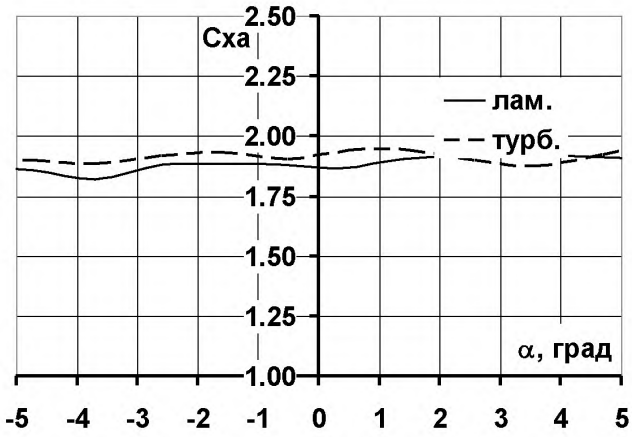



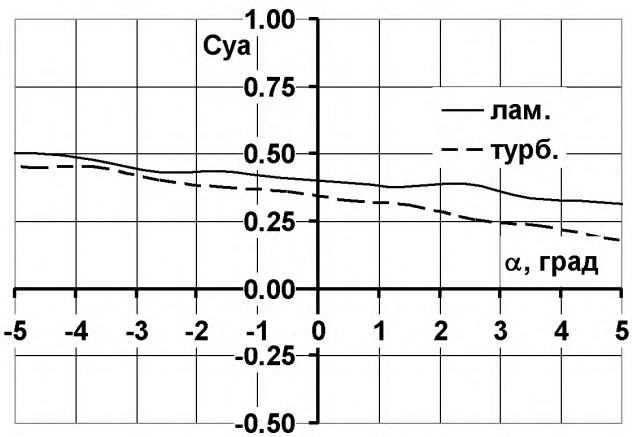

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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, $B_а$ / H = 1.24, $H_і$ / H = 0.142, $H_ò$ / H = 0.529) | Диаграмма 3-4 |
|---|---|



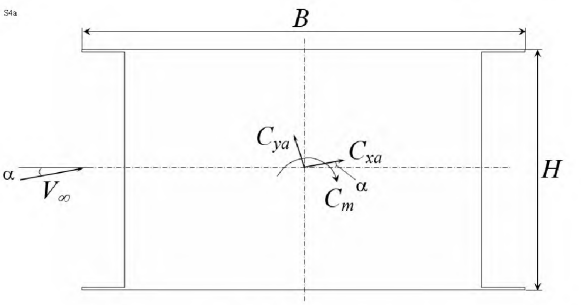



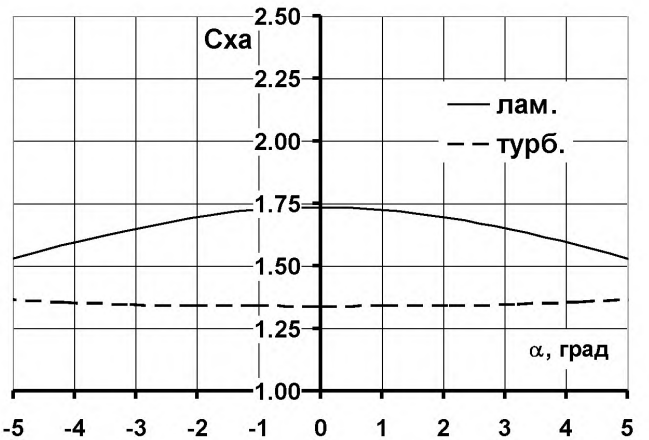



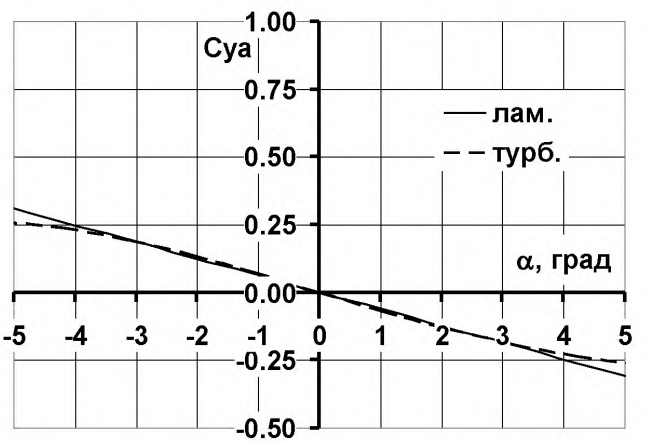

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 |
|---|---|



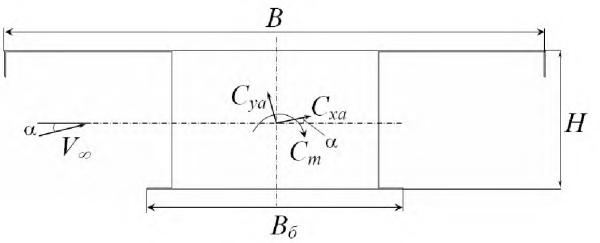



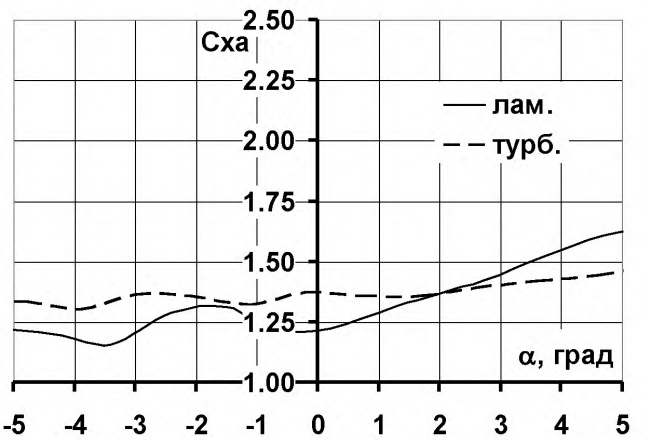



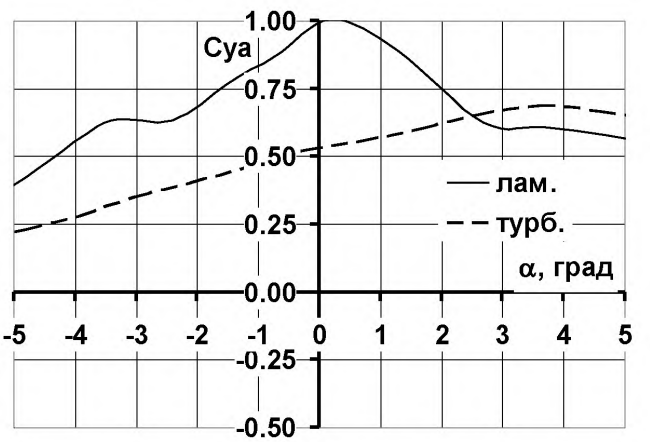

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 ($B / H = 3.9$, $B_б / H = 1.85$) | Диаграмма 4-2 |
|---|---|



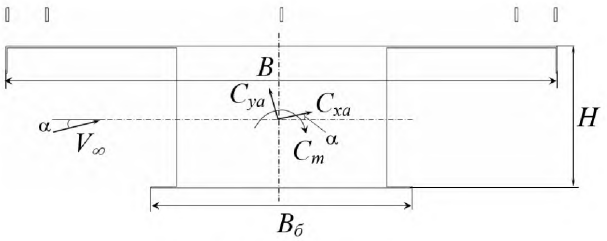



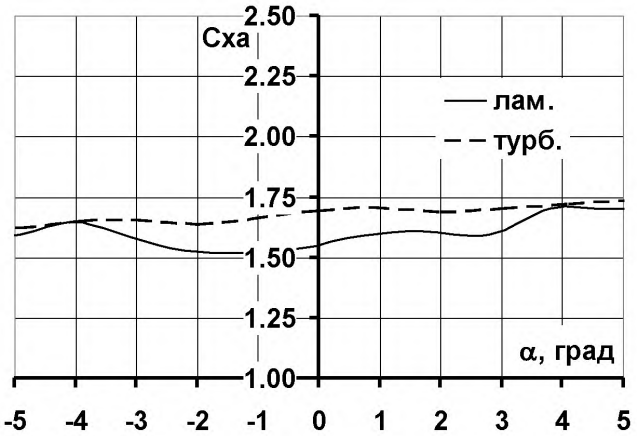



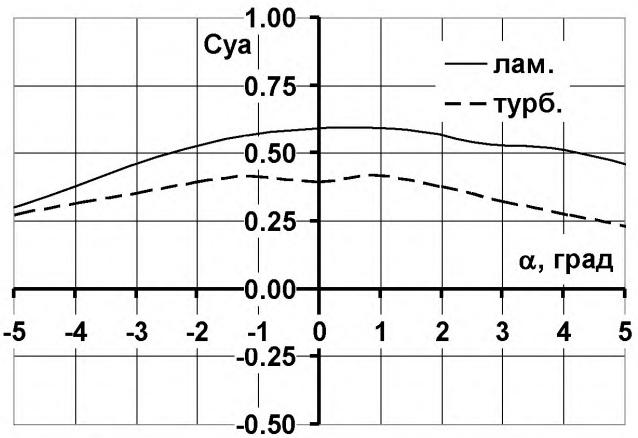

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c_{ya0}^{\alpha}$ | $c_{m0}^{\alpha}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 ($B/H=3.9$, $B_а/H=1.85$, $H_і/H=0.275$)** | **Диаграмма 4-3** |
|---|---|



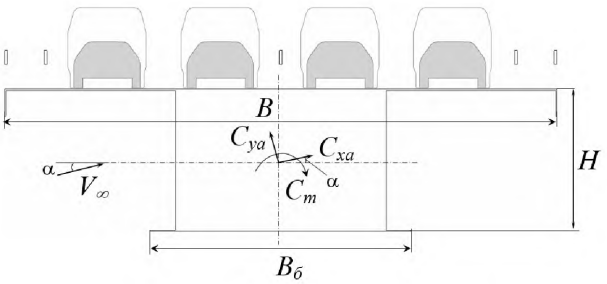



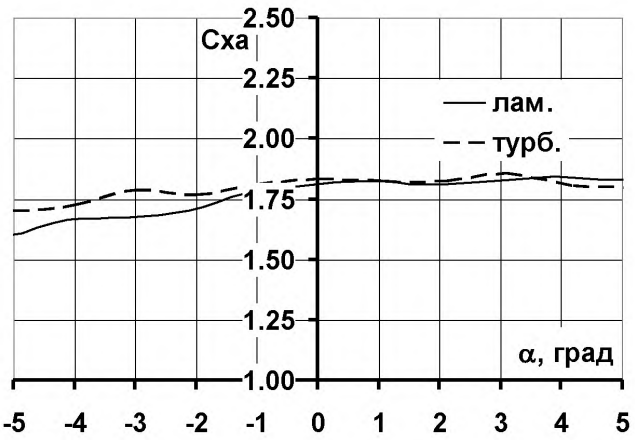



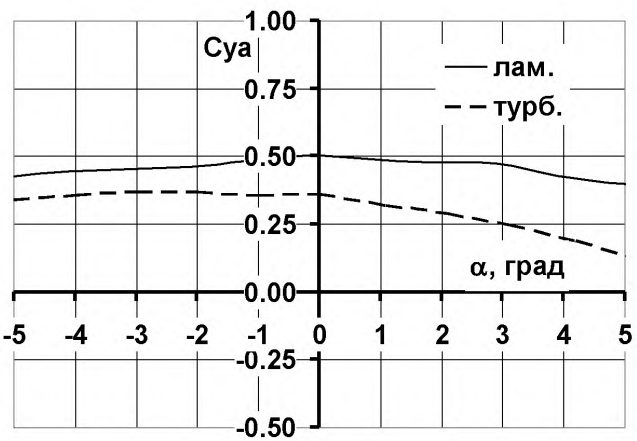

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| **поток** | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **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 ($B/H=3.9$, $B_а/H=1.85$, $H_і/H=0.275$, $H_ò/H=1.021$) | Диаграмма 4-4 |
|---|---|



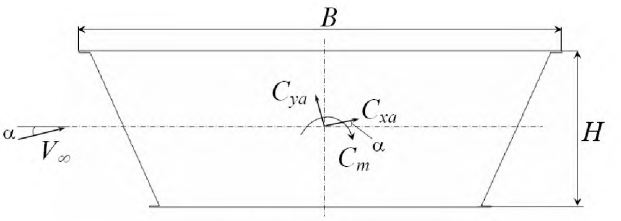



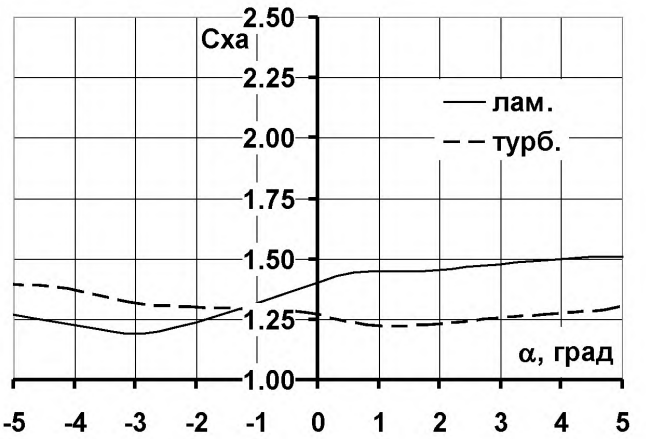



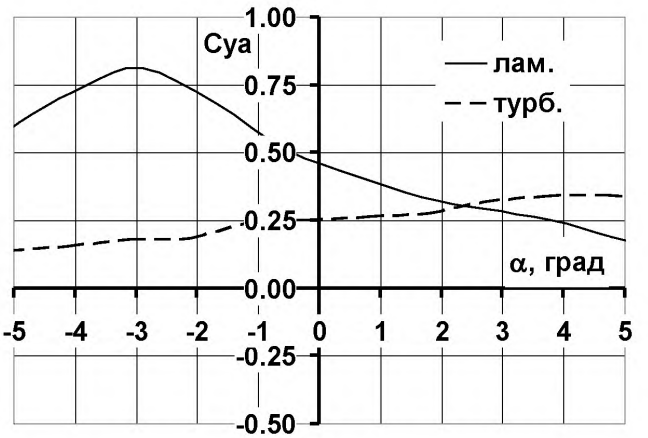

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 трапециевидного сечения ( B / H = 3.09, $B_a$ / H = 3.09) | Диаграмма 5-1 |
|---|---|



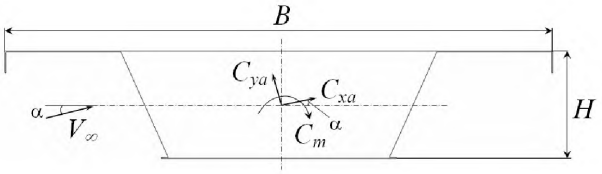



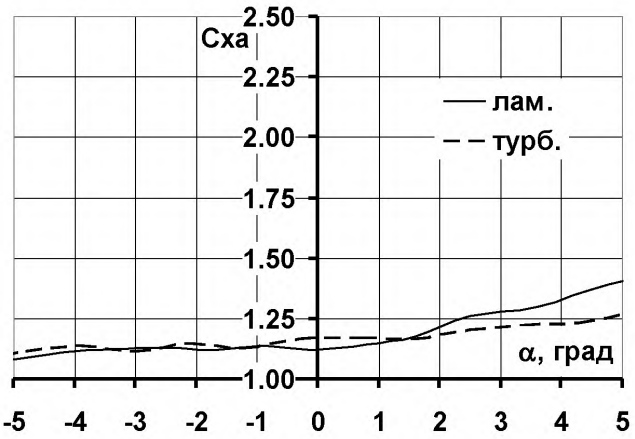



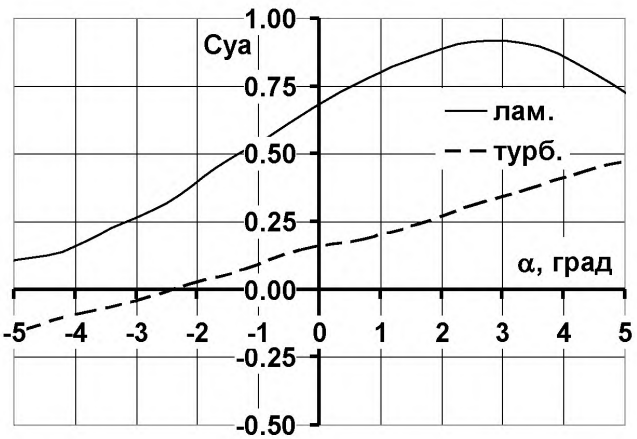

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c_{ya0}^{\alpha}$ | $c_{m0}^{\alpha}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 |
|---|---|



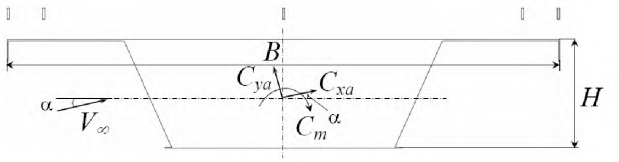



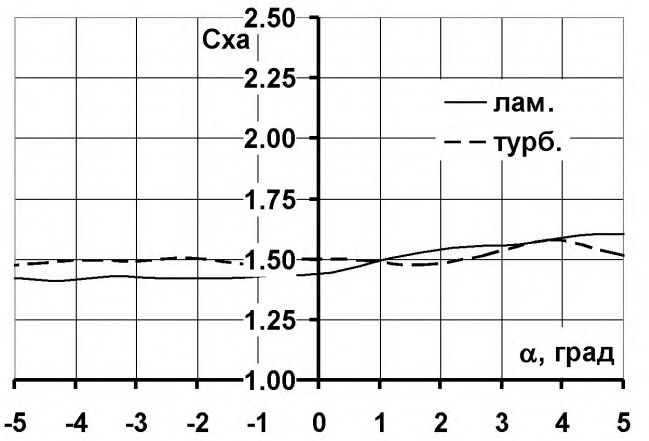



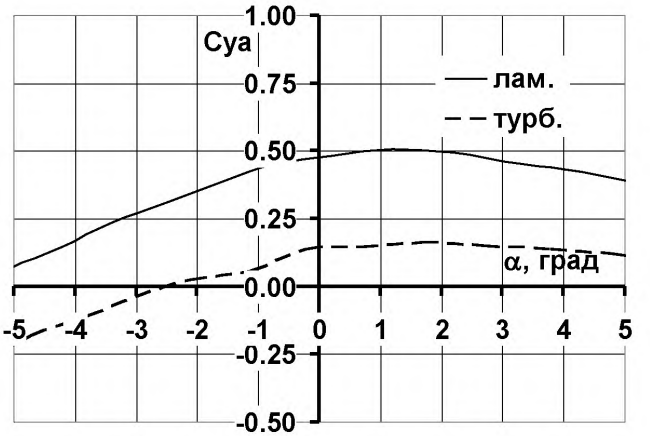

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 трапециевидного сечения с перекрытием и ограждениями ( B / H = 5.1, $B_a$ / H = 3.09, $H_i$ / H = 0.293) | Диаграмма 5-3 |
|---|---|



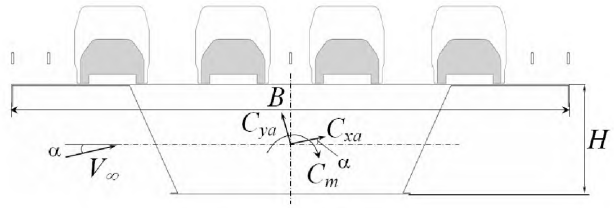



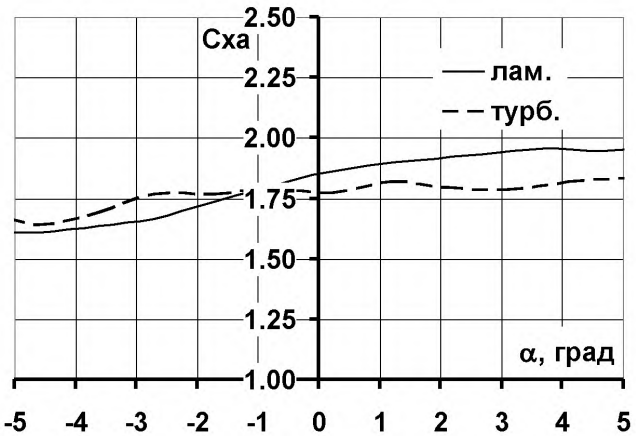



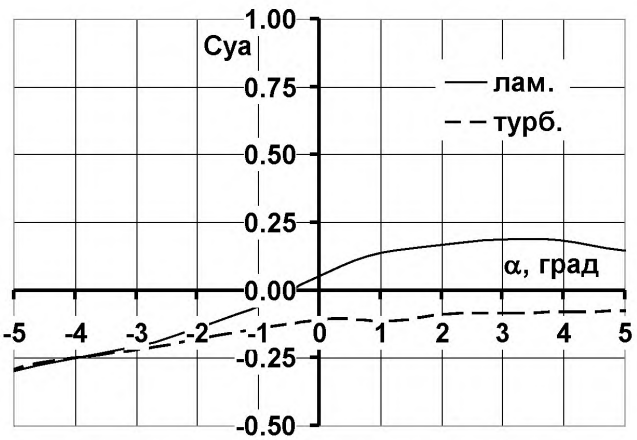

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 трапециевидного сечения с перекрытием, ограждениями и автотранспортом (B / H = 5.1, $B_á$ / H = 3.09, $H_ì$ / H = 0.293, $H_ò$ / H = 1.088) | Диаграмма 5-4 |
|---|---|



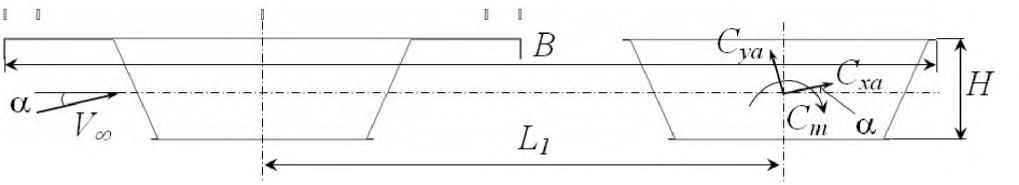



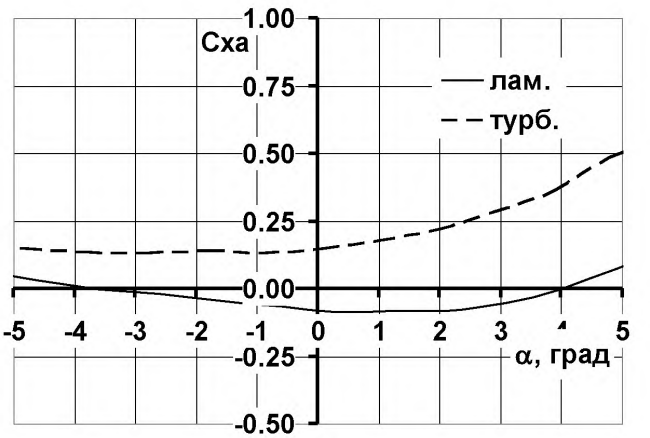



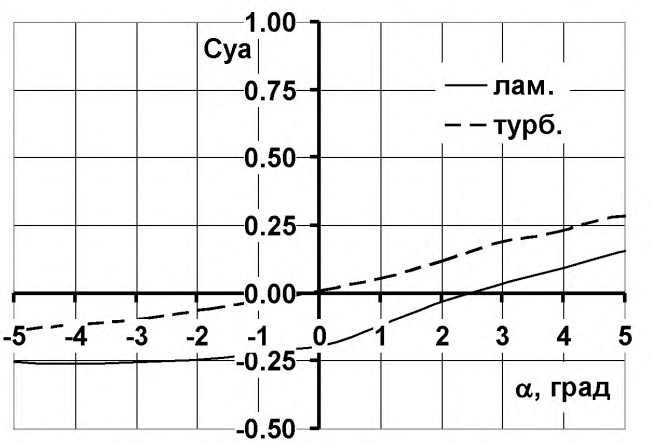

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c_{ya0}^{\alpha}$ | $c_{m0}^{\alpha}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 трапециевидного сечения, расположенная за аналогичной балкой с перекрытием и ограждениями ($B/H=8.19$, $B_a/H=3.09$, $L_1/H=5.1$, $H_i/H=0.293$) | Диаграмма 5-5 |
|---|---|



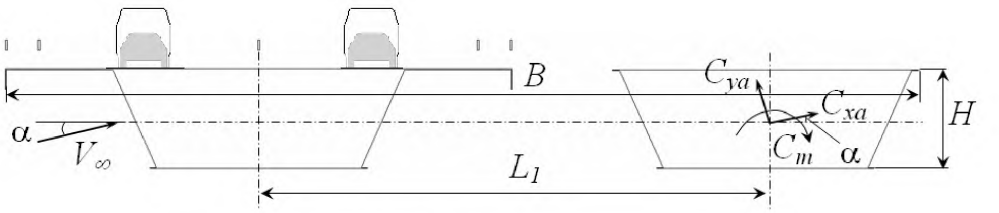



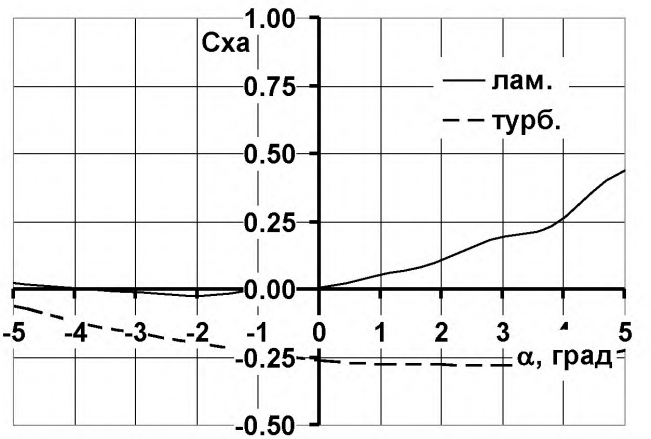



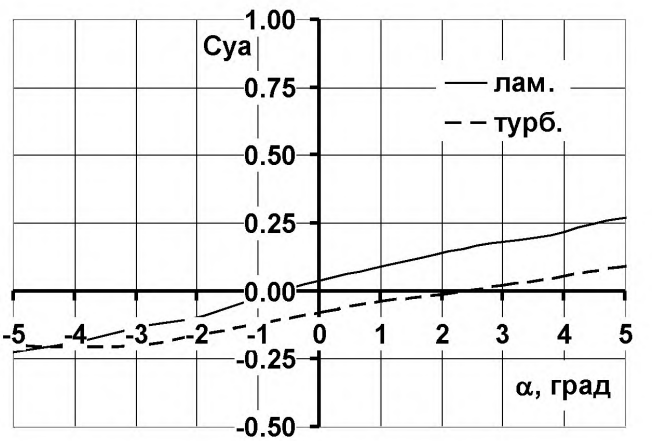

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 трапециевидного сечения, расположенная за аналогичной балкой с перекрытием, ограждениями и автотранспортом ($B/H=8.19$, $B_a/H=3.09$, $L_1/H=5.1$, $H_i/H=0.293$, $H_o/H=1.088$)** | **Диаграмма 5-6** |
|---|---|



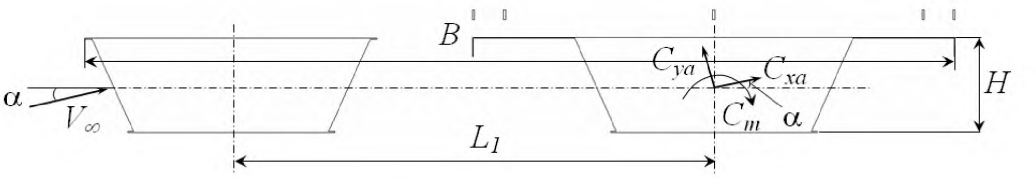



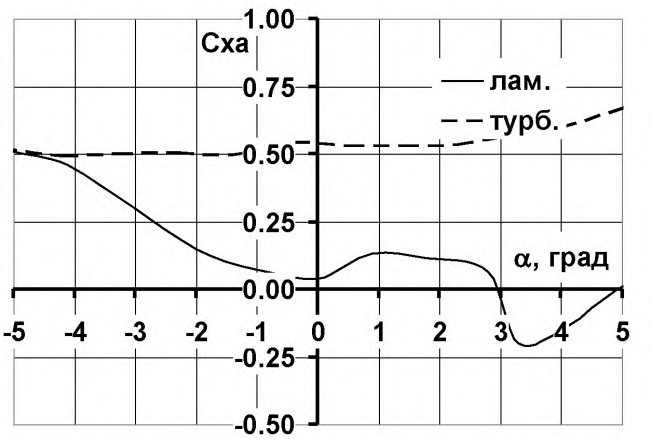



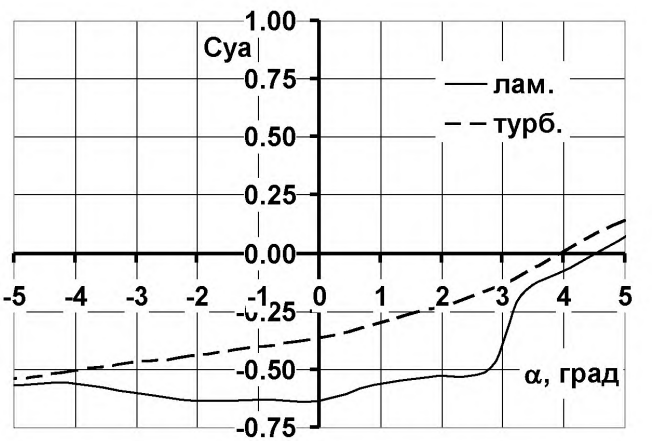

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| **поток** | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **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 трапециевидного 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** |
|---|---|



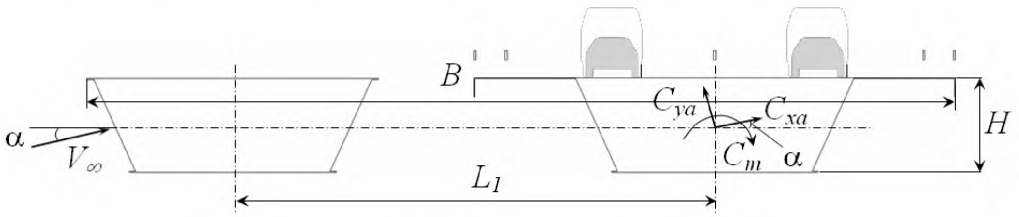



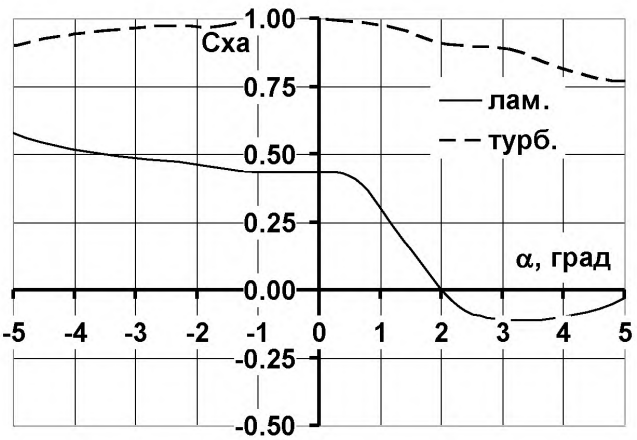



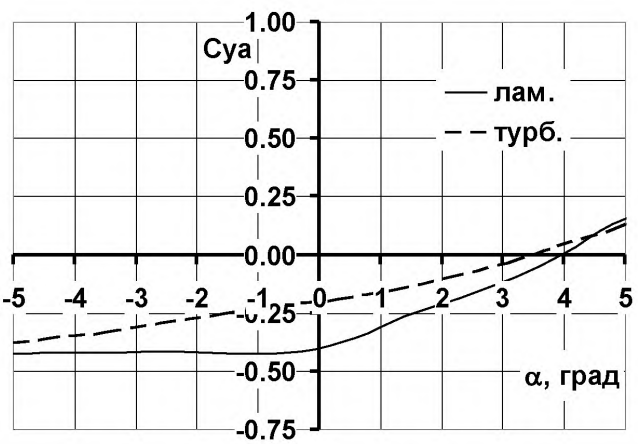

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| **поток** | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **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 трапециевидного сечения с перекрытием, ограждениями и автотранспортом, расположенная за аналогичной балкой без перекрытия и ограждений ($B/H=8.19$, $B_a/H=5.1$, $L_1/H=5.1$, $H_1/H=0.293$, $H_2/H=1.088$)** | **Диаграмма 5-8** |
|---|---|



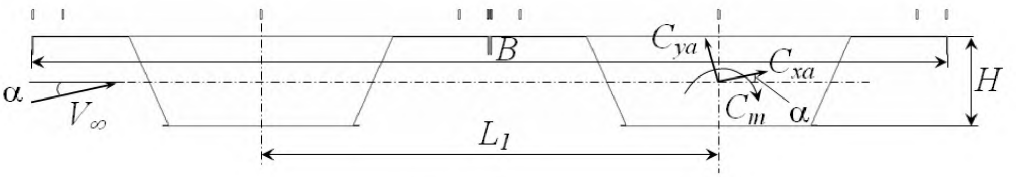



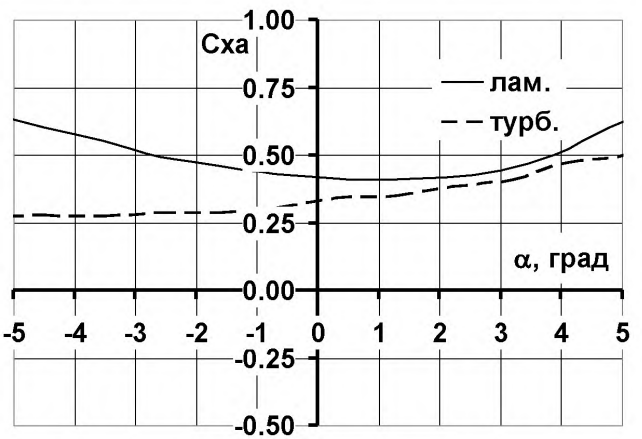



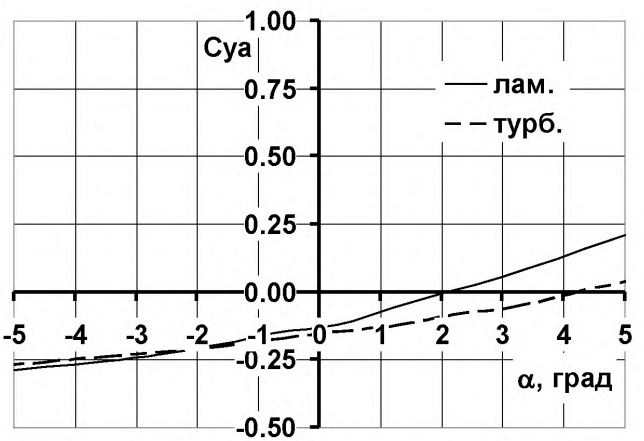

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| **поток** | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **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 трапециевидного сечения, с перекрытием и ограждениями, расположенная за аналогичной балкой ($B/H=10.2$, $B_a/H=3.09$, $L_1/H=5.1$, $H_1/H=0.293$) | Диаграмма 5-9 |
|---|---|



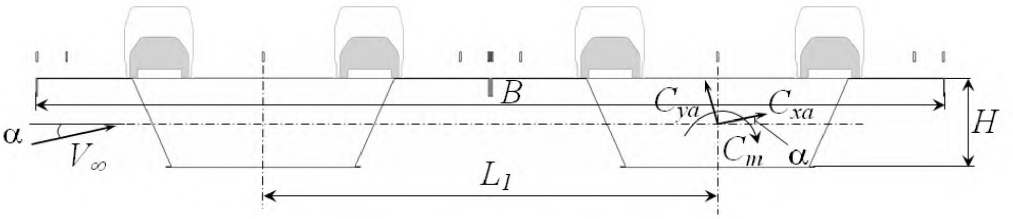



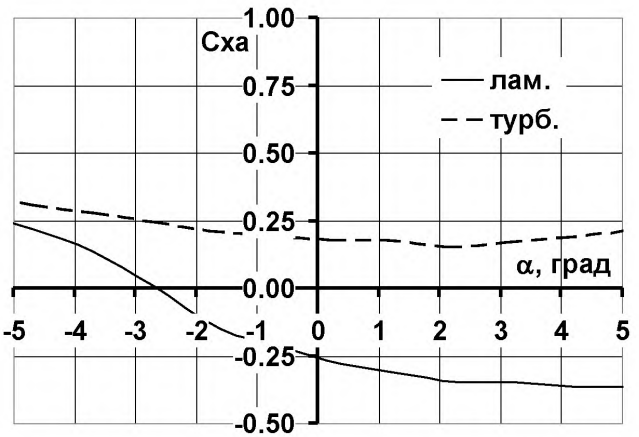



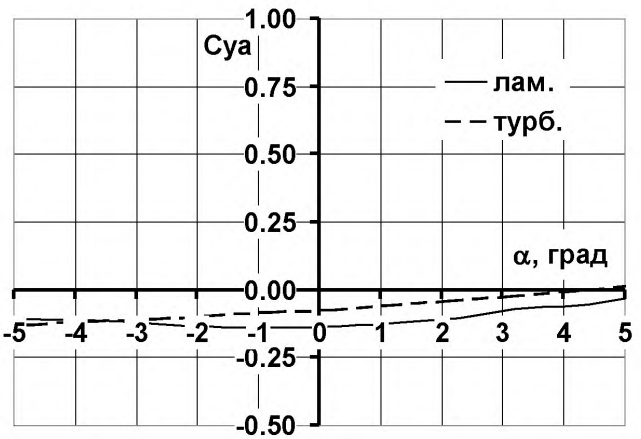

**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 трапециевидного сечения, с перекрытием, ограждениями и автотранспортом, расположенная за аналогичной балкой (B / H = 10.2, $B_а$ / H = 5.1, $L_1$ / H = 5.1, $H_ì$ / H = 0.293, $H_ò$ / H = 1.088) | Диаграмма 5-10 |
|---|---|



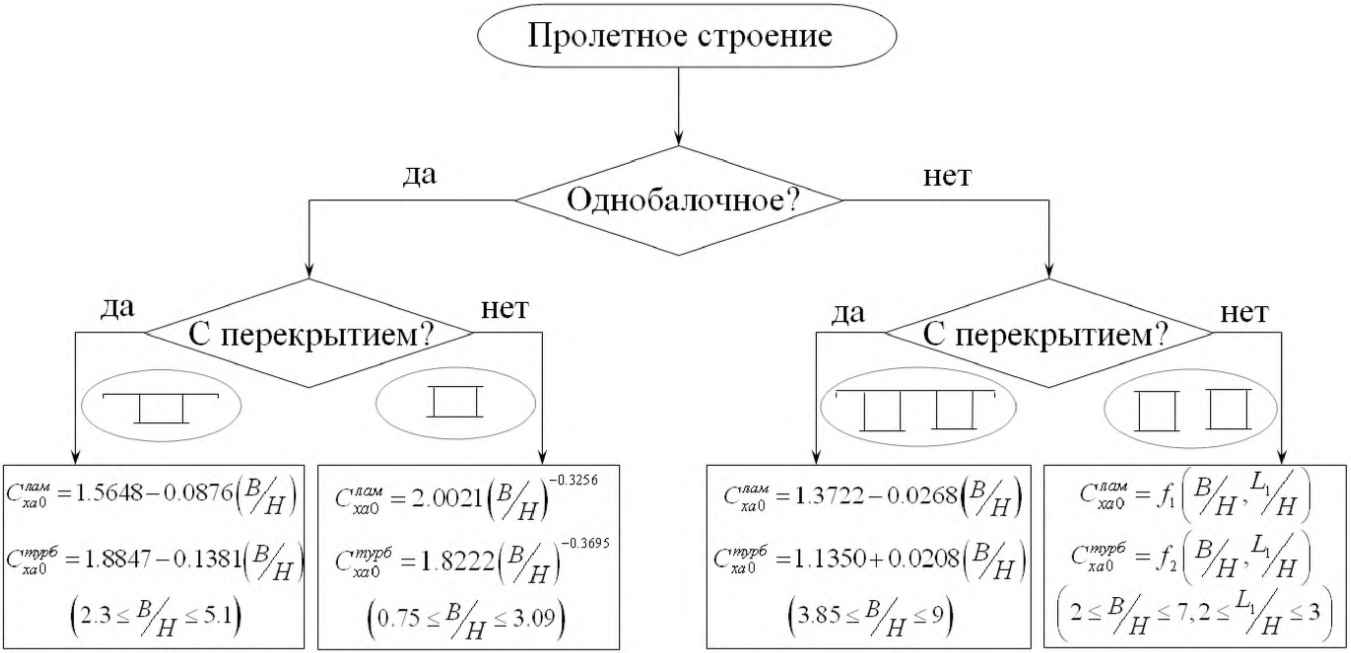




**Характеристики при нулевом угле атаки:**

| поток | $c_{xa0}$ | $c_{ya0}$ | $c_{m0}$ | $c^{\alpha}_{ya0}$ | $c^{\alpha}_{m0}$ | $A$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 |

| Коэффициент лобового сопротивления сечений, близких по форме к типовым (без ограждений и автотранспорта) | Диаграмма 6-1 |
|---|---|




$$f_1\left(\frac{B}{H},\frac{L_1}{H}\right) = 0.308 + \left(0.115 - 0.00992\frac{B}{H}\right)\frac{B}{H} + 0.332\frac{L_1}{H},$$

$$f_2\left(\frac{B}{H},\frac{L_1}{H}\right) = -0.555 + \left(0.0981 - 0.00312\frac{B}{H}\right)\frac{B}{H} + 0.754\frac{L_1}{H}.$$

# 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)

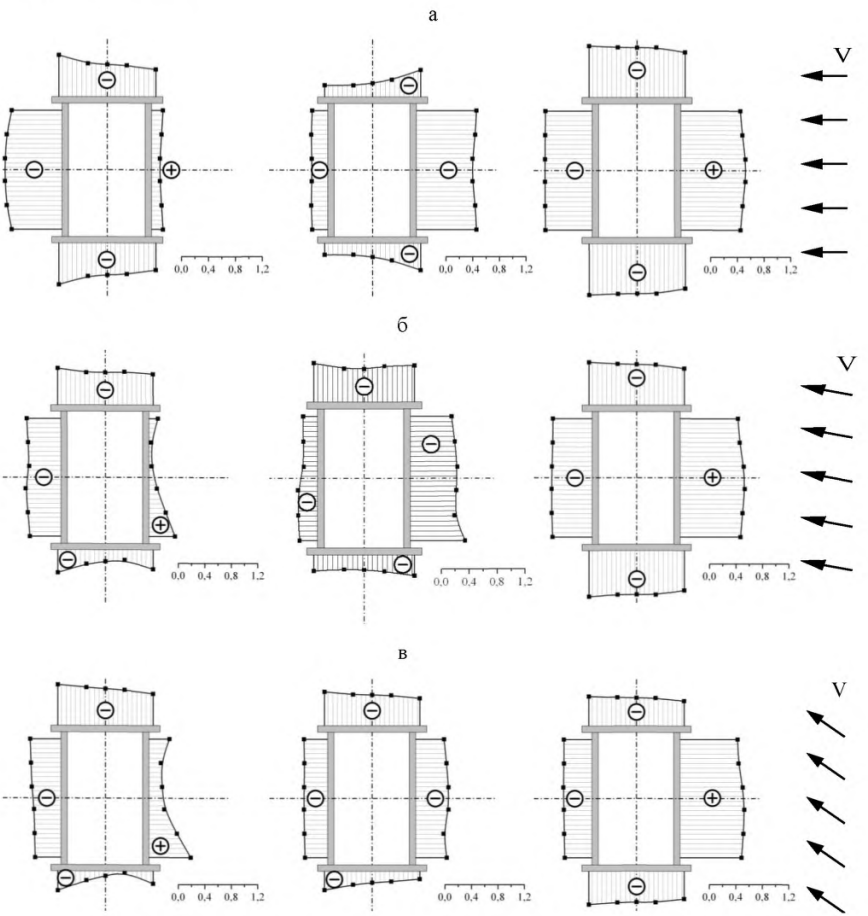



Рисунок Б.1 – Распределение коэффициента давления по периметру трехбалочного сечения в ламинарном потоке в зависимости от угла атаки:
а – $\alpha = 0$; б – $\alpha = 5°$; в – $\alpha = 10°$.

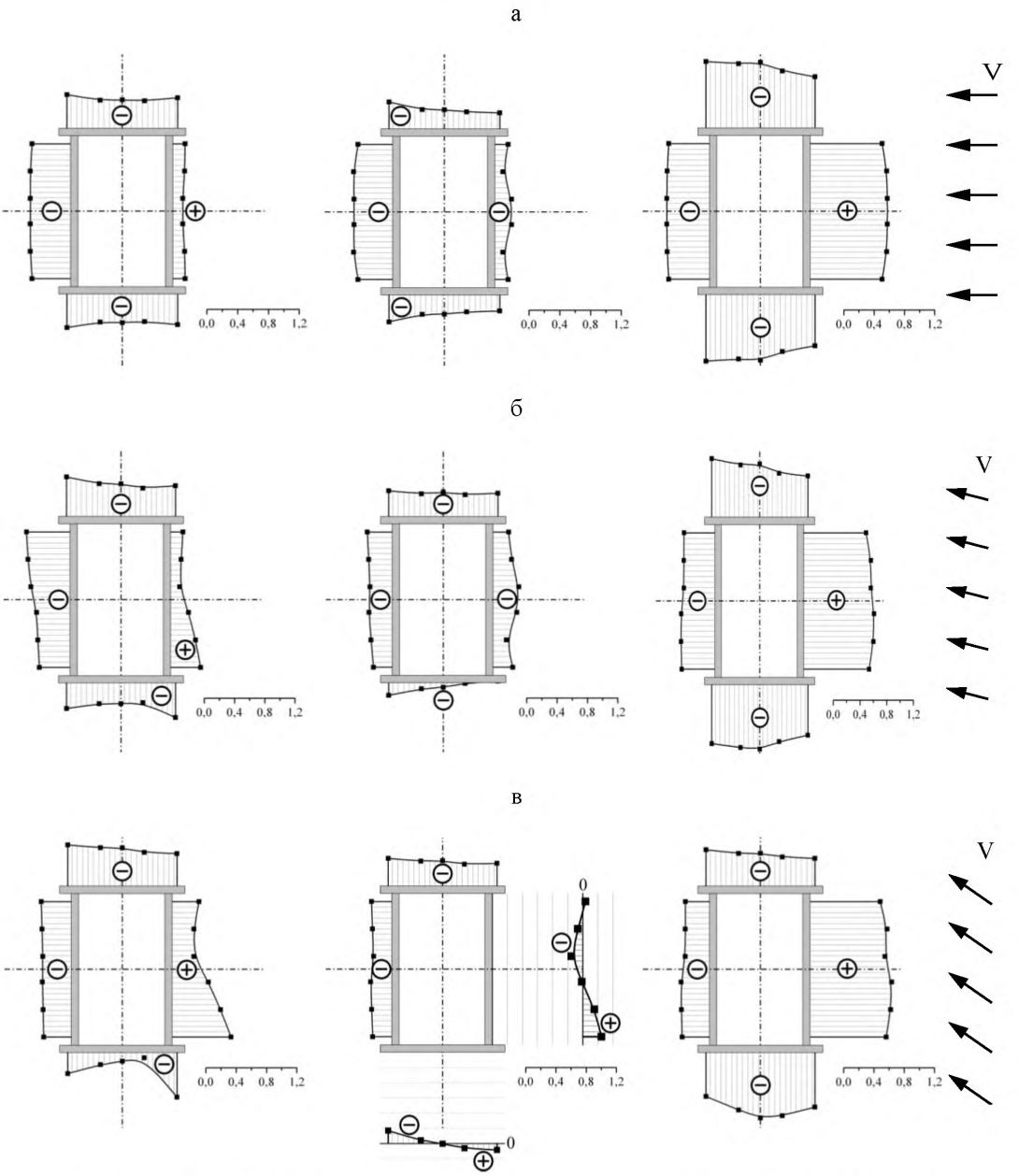



Рисунок Б.2 – Распределение коэффициента давления по периметру трехбалочного сечения в турбулентном потоке в зависимости от угла атаки:
а – $\alpha = 0$; б – $\alpha = 5°$; в – $\alpha = 10°$.

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

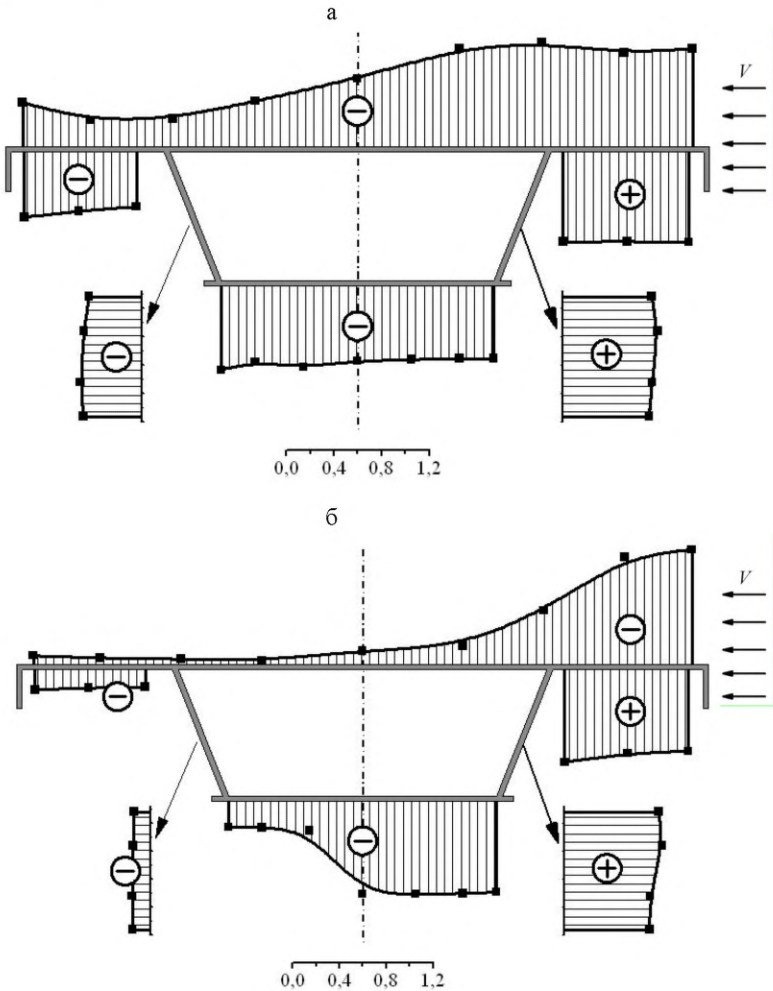



Рисунок Б.3 – Распределение коэффициента давления по периметру трапециевидной балки с перекрытием при $\alpha = 0$: а – ламинарном поток; б – турбулентный поток.

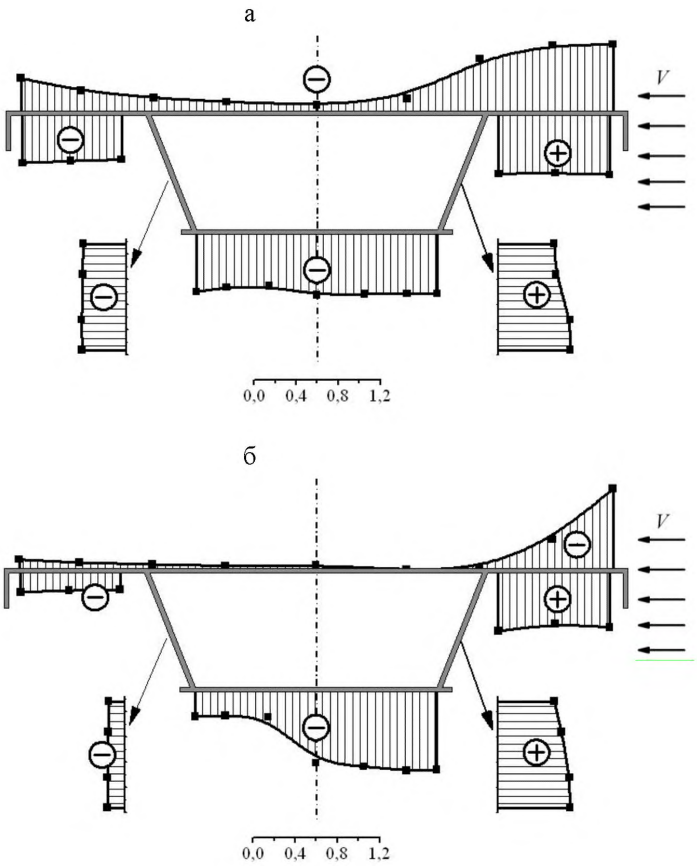



Рисунок Б.4 – Распределение коэффициента давления по периметру трапециевидной балки с перекрытием при $\alpha$ =-5°: а – ламинарный поток; б – турбулентный поток.

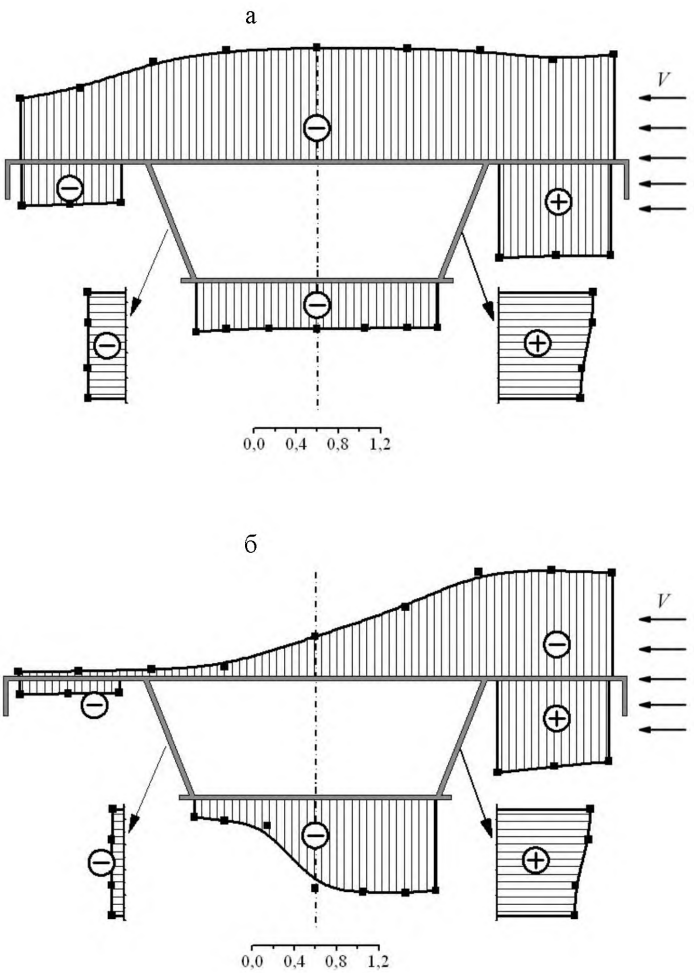



Рисунок Б.5 – Распределение коэффициента давления по периметру трапециевидной балки с перекрытием при $\alpha = 5°$: а – ламинарный поток; б – турбулентный поток.

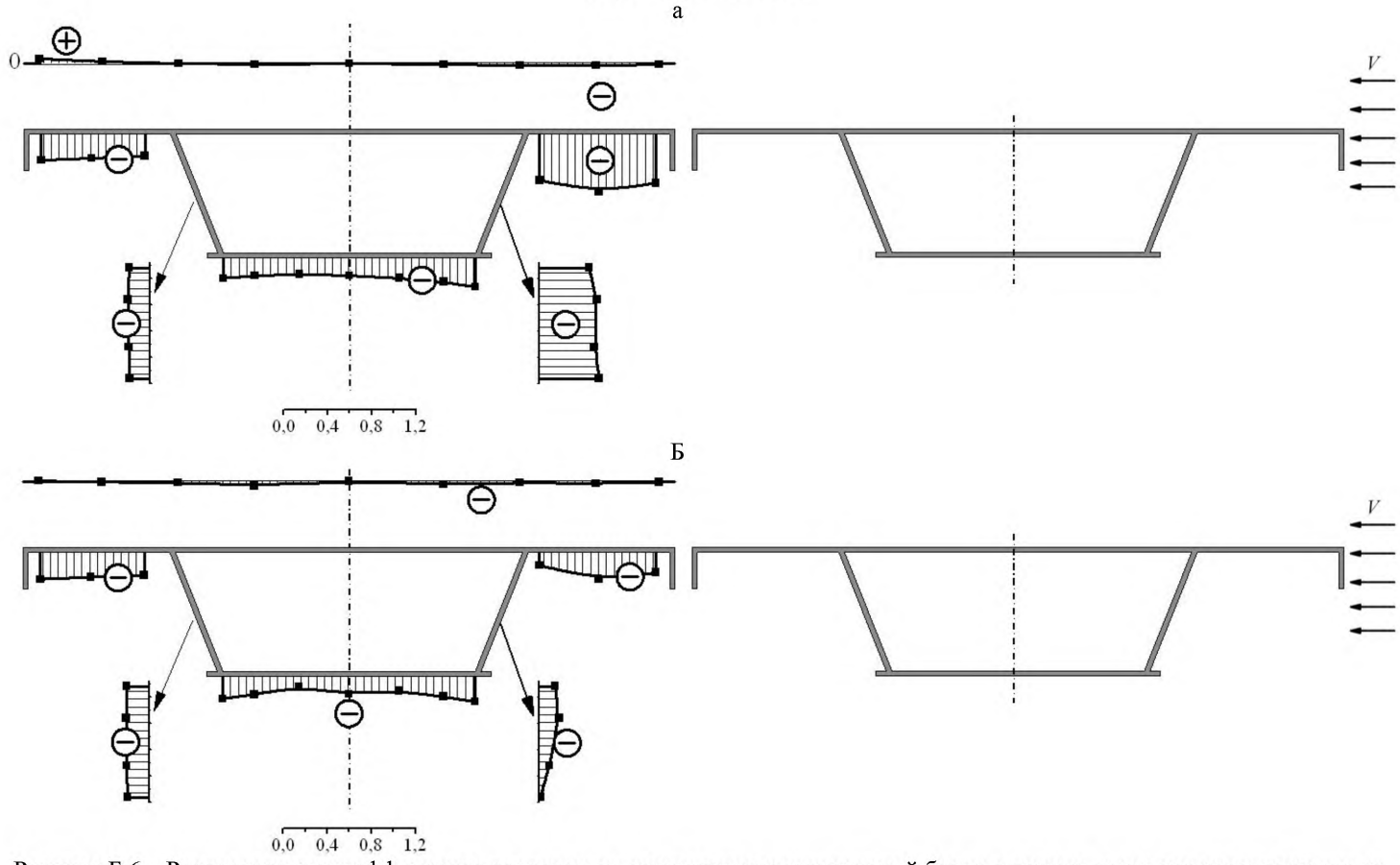



Рисунок Б.6 – Распределение коэффициента давления по периметру трапециевидной балки с перекрытием при расположении за аналогичной балкой ($L_1 / H = 5.1$) при $\alpha = 0°$: а) ламинарный поток; б) турбулентный поток

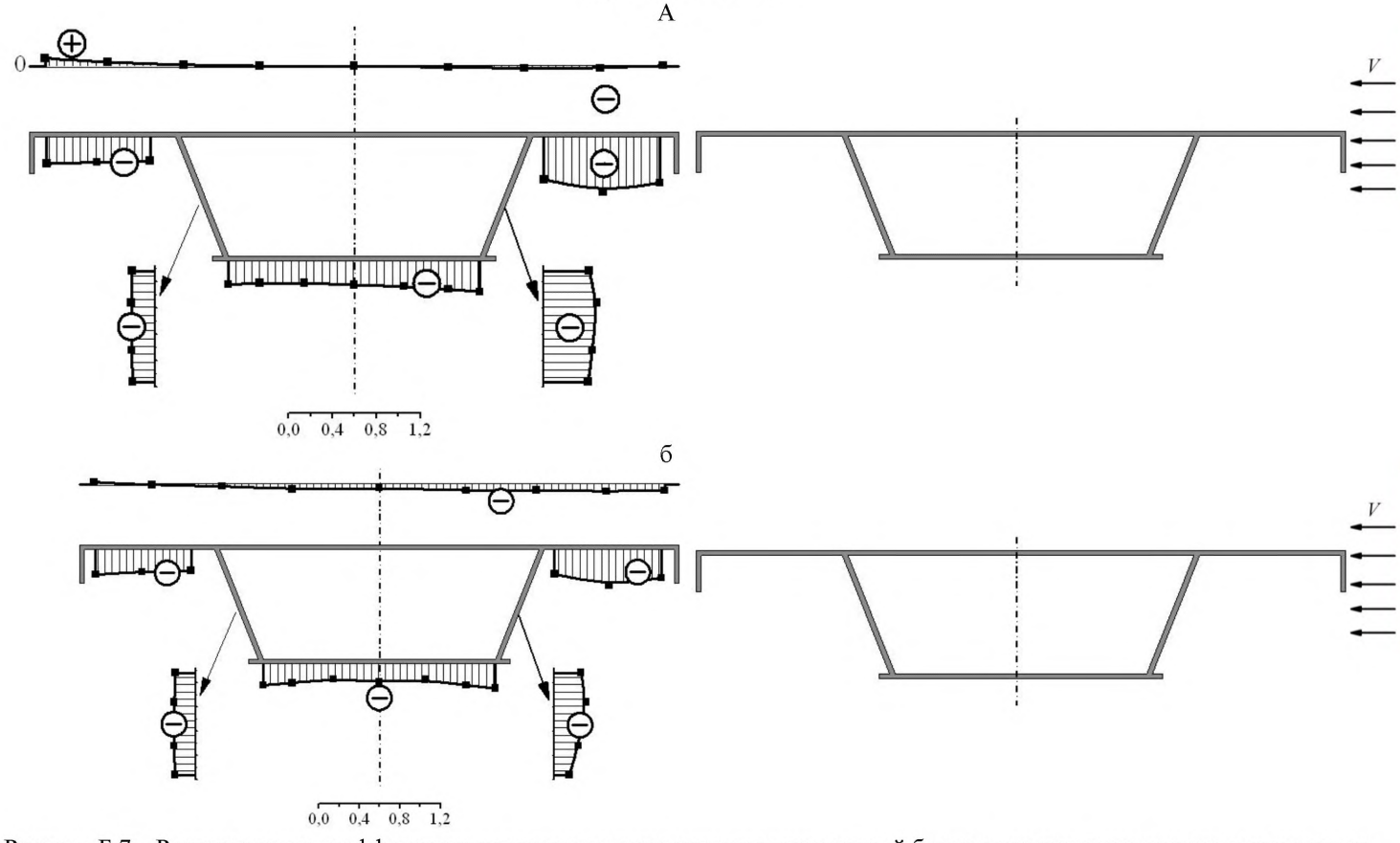



Рисунок Б.7 – Распределение коэффициента давления по периметру трапециевидной балки с перекрытием при расположении за аналогичной балкой ( $L_1 / H = 5.1$) при $\alpha$ =-5°: а) ламинарный поток; б) турбулентный поток.

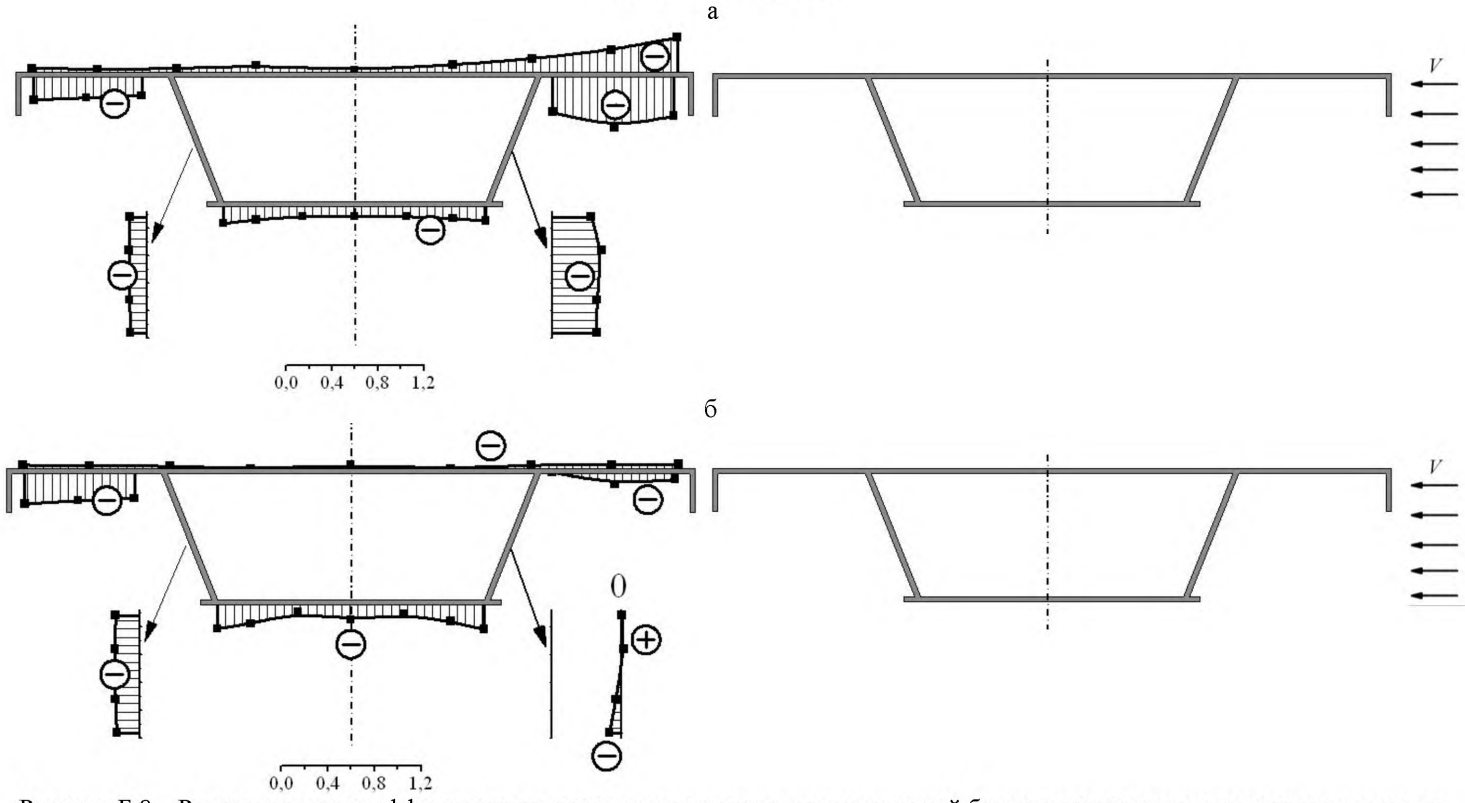
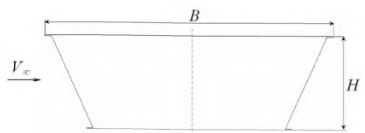
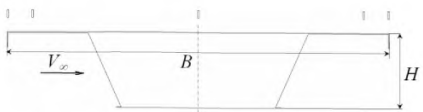
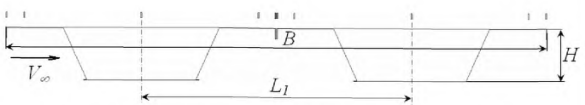
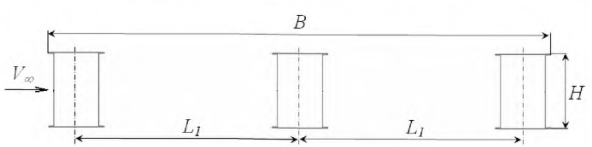



Рисунок Б.8 – Распределение коэффициента давления по периметру трапециевидной балки с перекрытием при расположении за аналогичной балкой ( $L_1 / H = 5.1$) при $\alpha = 5°$: а) ламинарный поток; б) турбулентный поток.

# 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 Струхаля $Sh = f_{а}H / V_{\infty}$ ($f_{а}$ – частота схода вихрей).

| Сечение | Sh | |
|---|---|---|
| | лам. | турб. |
|  **(B / H = $B_{а}$ / H = 3.09)** | **0.109** | **0.093** |
|  **(B / H = 5.1, $B_{а}$ / H = 3.09, $H_{i}$ / H = 0.293)** | **0.073** | **0.096** |
|  **(B / H = 10.2, $B_{а}$ / H = 3.09, $L_1$ / H = 5.1, $H_{i}$ / H = 0.293)** | **0.087** | **0.113** |
|  **(B / H = 6.75, $B_{а}$ / H = 0.75, $L_1$ / H = 3)** | **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 натурных строений $H = 2\ldots7$ 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):

$$\mathrm{Re} = \mathrm{idem} \quad \text{или} \quad \frac{V_{\text{н}} H_{\text{н}}}{\nu_{\text{н}}} = \frac{V_{\text{м}} H_{\text{м}}}{\nu_{\text{м}}}.$$

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 ($10^4 < \mathrm{Re} < 10^7$) 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, $\mathrm{Re}_{\text{м}} = VH/\nu \sim 0.3 \cdot 10^5$, то есть находится в автомодельной зоне.

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

$$\mathrm{Sh} = \mathrm{idem} \quad \text{или} \quad \frac{f_{\text{н}} H_{\text{н}}}{V_{\text{н}}} = \frac{f_{\text{м}} H_{\text{м}}}{V_{\text{м}}}.$$

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

Условие подобия степени турбулентности $\varepsilon_\infty = \mathrm{idem}$ 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 $B_{\text{п}}$ определялась по четному числу полос $n_1$ для движения автотранспорта при ширине одной полосы $W_1 = 3$ или 2.5 м: $B_{\text{п}} = n_1 W_1$. 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 $H_{\text{о}} = 1$ м и $H_{\text{щ}} = 0.35$ м для натурных 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).

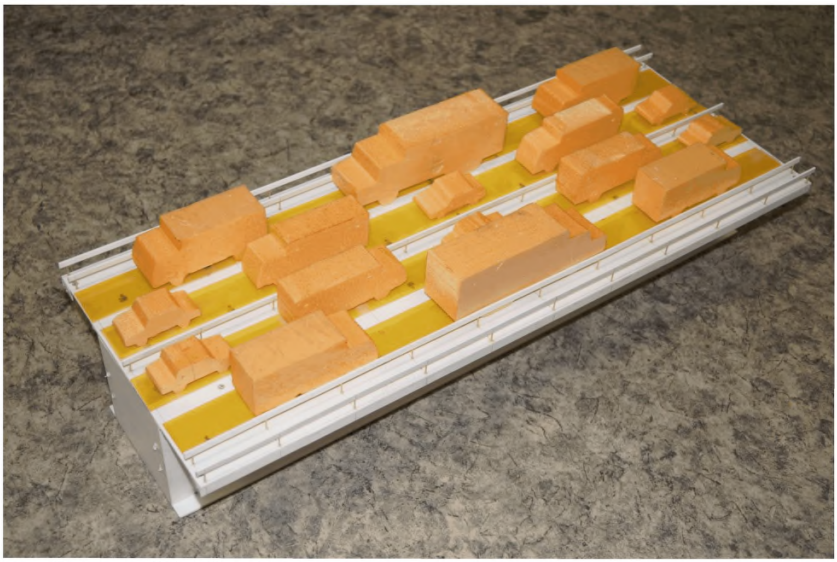


Рисунок Г.1 – Секционная модель с автотранспортными средствами на проезжей части.

### 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 $C_{p\text{ср}} = -0.0007$.

- Градиент коэффициента статического давления по оси рабочей части.

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

- Неравномерность поля скоростных напоров (скоростей) не более 1%.

- Относительная погрешность воспроизведения скорости не более

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

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 $c_{xa} = 2.04 \ldots 2.3$ 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 тензовесы).

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 $3 \cdot 10^4 \ldots 1.2 \cdot 10^5$.

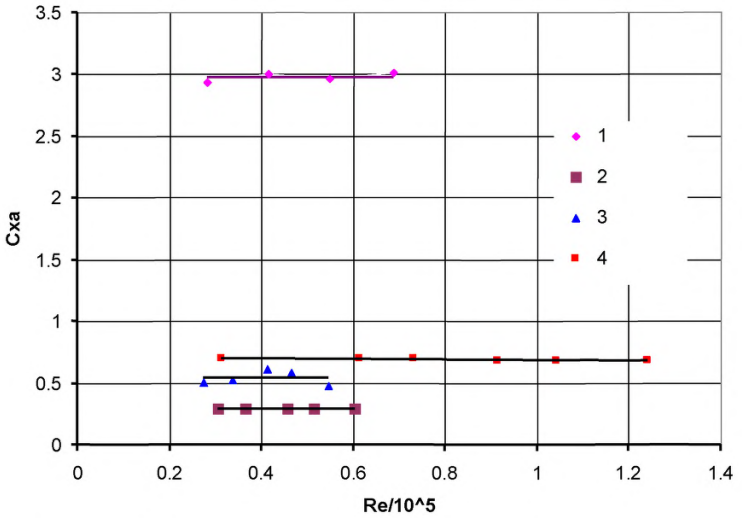



Рисунок Г.3 – Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса. Формы сечений: 1 – диаграмма 1-1, 2 – 5-3, 3 – 1-6, 4 – 3-3.

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

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

При этом изменение скорости набегающего $dV$ потока по высоте строения по сравнению со средней скоростью на высоте строения $V_{ср}$ мало. Например, при степенном законе изменения скорости по высоте $V/V_0 = (z/z_0)^{\beta}$ с показателем $\beta = 0.2$, $H_{ср} = 20$ м, $H_{стр} = 4$ м изменение скорости по высоте строения составит не более ±2% (рисунок Г.4), то есть строение обдувается набегающим потом 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 $H_{ср}$.

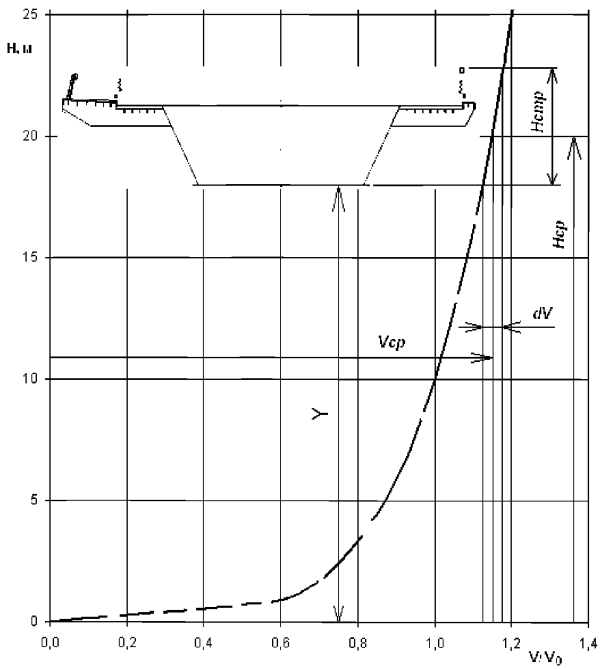



Рисунок Г.4 – Схема обтекания пролетного строения градиентным потоком

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 $\mathrm{Re} = 1.3 \cdot 10^5$, так и за турбулизирующей решеткой при $\mathrm{Re} = 1 \cdot 10^5$. 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 $Y / H_{\text{стр}} > 1$. Подъемная сила по мере приближения к экрану изменяется на 10% при $Y / H_{\text{стр}} \approx 1{,}5$, но при $Y / H_{\text{стр}} = 1$ ее изменение достигает уже 40%.

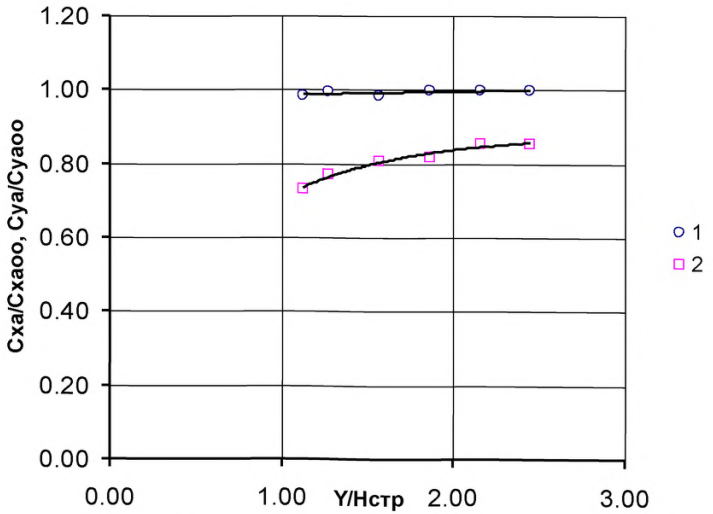



Рисунок Г.5 – Влияние экрана в малотурбулентном потоке:
$1 - c_{xa} / c_{xa\infty}$, $2 - c_{ya} / c_{ya\infty}$.

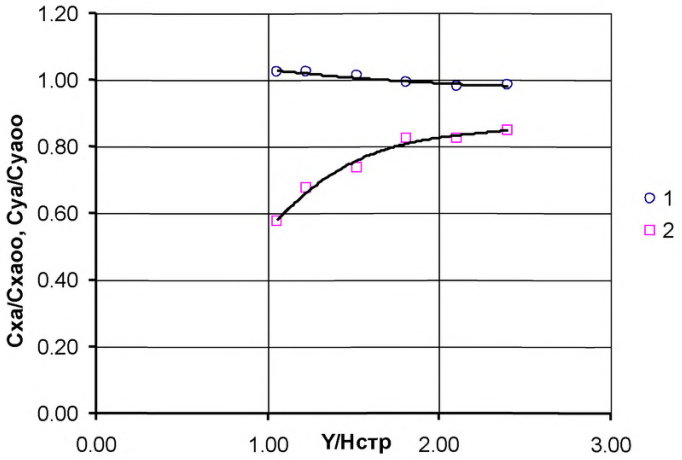



Рисунок Г.6 – Влияние экрана в турбулентном потоке
$1 - c_{xa} / c_{xa\infty}$, $2 - c_{ya} / c_{ya\infty}$.

Таким образом, результаты экспериментов без экрана могут быть использованы для горизонтально расположенных строений, относительная высота которых над экраном $Y / H_{\text{стр}} > 2 \ldots 2.5$ (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 $\varepsilon_\infty$ 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 «низкорейнольдсовые» (безразмерное расстояние первого узла до стенки $y^+ \le 3 \ldots 4$) 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 $H/12 \ldots H/10$. К внешним границам размер ячеек возрастал до $H/4 \ldots H/3$. На периметр обтекаемого контура в зависимости от его формы приходилось порядка $10^2 \ldots 10^3$ ячеек. Общее количество ячеек варьировалось от 100…120 тысяч (для простых форм сечений) до 250…300 тысяч (для сложных).

Расчетные сетки для натурных объектов имели меньшую плотность узлов у стенки ($y^+ = 30 \ldots 1000$ 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 трапециевидного сечения с перекрытием и ограждениями приведен на рисунке Г.7.

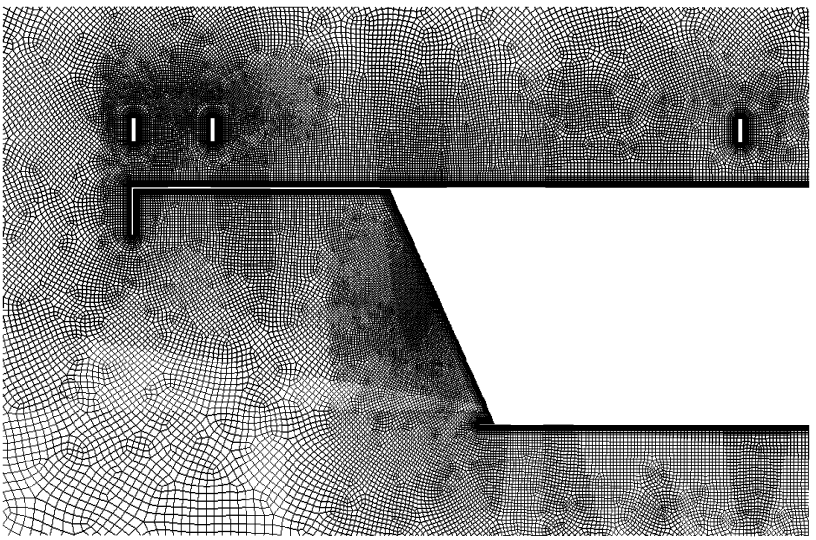


Рисунок Г.7 – Пример расчетной сетки (фрагмент).

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 $\Delta t$ составлял $(0.02...0.04)H/V_\infty$, т.е. при сходе вихрей с безразмерной частотой $\mathrm{Sh} = f_a H/V_\infty = 0.1$ $\Delta t$ 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: $\alpha$ – угол атаки, $c'_{xa}$ и $c'_{ya}$ – коэффициенты пульсационных составляющих лобового сопротивления и подъемной силы.

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

| Источник | $\mathrm{Re}\cdot 10^3$ | $\varepsilon$, % | $c_{xa}$ | $c'_{xa}$ | $c'_{ya}$ | 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 |

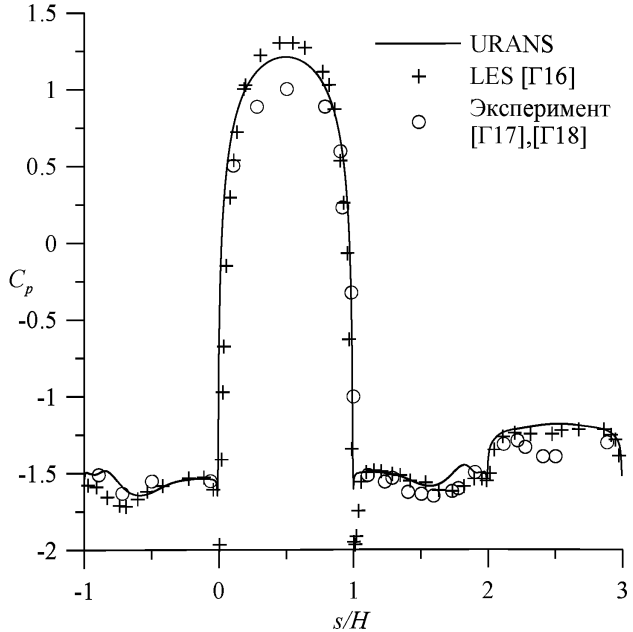



Рисунок Г.8 – Распределение коэффициента осредненного давления по периметру балки квадратного сечения.

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» ($\mathrm{Re}=0.3\cdot10^5$) и «высокорейнольдсовых» ($\mathrm{Re}=43\cdot10^5$) 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 Струхаля демонстрируют расчеты обтекания сечений уменьшенных размеров ($\mathrm{Re}=0.3\cdot10^5$).

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

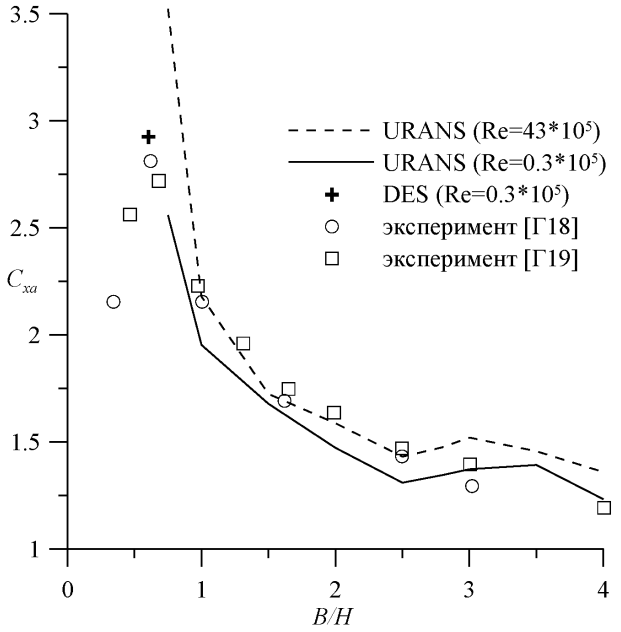



Рисунок Г.9 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления от относительной ширины балки.

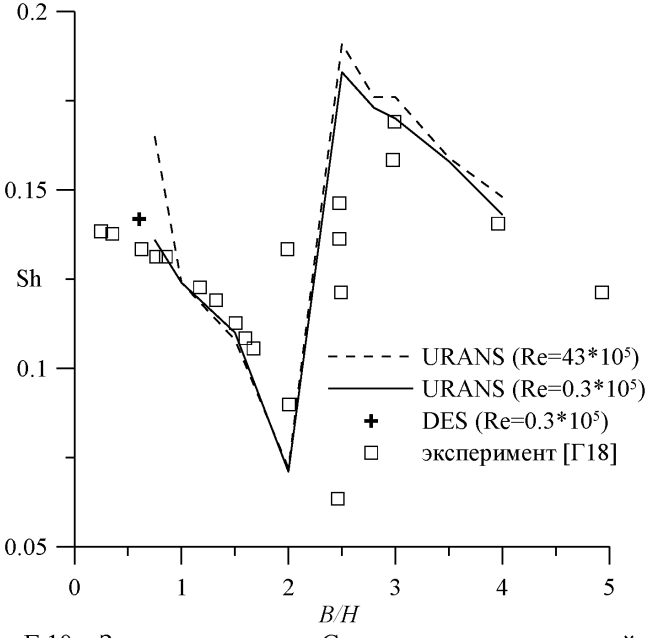



Рисунок Г.10 – Зависимость числа Струхаля от относительной ширины балки.

Для большинства исследованных в работе поперечных сечений результаты расчетов по описанной методике в диапазоне углов атаки -5°…5° 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. – 966. – 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:
gost.e-ecolog.ru
[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 сплошностенчатые 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 плохообтекаемых 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. Швецовой; 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

| должность | личная подпись | инициалы, фамилия |
|---|---|---|
| Ректор | | Н.В. Пустовой |

gost.e-ecolog.ru