

# Аэродинамическая устойчивость большепролетных мостов



**С. Ю. Соловьев,**  
канд. физ.-мат. наук,  
член IABSE, зам.  
начальника отделения  
гидроаэродинамики  
ФГУП «Крыловский  
государственный  
научный центр»

В статье приведены подходы к оценке склонности сооружений к аэродинамической неустойчивости. Рассмотрены особенности разных типов аэроупругих колебаний. Описана ландшафтная аэродинамическая труба, построенная в Крыловском центре для модельных экспериментов, результаты которых необходимо учитывать при проектировании уникальных конструкций.

При проектировании большепролетных мостов особое внимание уделяется исследованию их аэродинамической устойчивости под действием ветра. Хорошо известно, что мосты с длиной пролета более 100 м могут быть подвержены аэроупругим колебаниям с большой амплитудой и даже разрушению. Примером недопустимо больших колебаний может служить вихревой резонанс Волгоградского моста, а примером разрушения – Такомский мост в США. Сегодня практически все большепролетные мосты проходят аэродинамические испытания, цель которых – найти и устранить негативные эффекты, поэтому случаи разрушения мостов под действием ветра не повторяются. Указанные исследования уникальных мостов проводят в специализированных аэродинамических трубах. Они, в отличие от самолетных аэродинамических труб, имеют закрытую рабочую часть и способны моделировать столь важный приземный слой атмосферы. В Крыловском центре для этих исследований построена ландшафтная аэродинамическая труба.

## 1. Аэроупругая устойчивость сооружения в ветровом потоке

Приведем основные причины аэроупругих колебаний мостовых сооружений и их элементов в ветровом потоке:

- порывы ветра;
- переменная аэродинамическая сила, вызванная периодическим срывом вихрей Кармана;
- отрицательное аэродинамическое демпфирование, которое приводит к автоколебаниям;
- аэродинамическая связь между изгибной и крутильной формами деформаций;

- периодические изменения значений параметров системы.

Аэроупругие колебания характеризуются двумя главными параметрами: критической скоростью возникновения колебаний и значением максимальной амплитуды колебаний. Для первичной оценки склонности сооружения к тому или иному виду аэродинамической неустойчивости на ранних стадиях проектирования следует воспользоваться подходами, приведенными далее.

### 1.1. Вихревое возбуждение

Вихревое возбуждение – это колебания, возникшие вследствие совпадения собственной частоты конструкции с частотой срыва вихрей Кармана. Как правило, значение критической скорости ветра для возникновения вихревого возбуждения по 1-й собственной частоте находится в диапазоне 10–20 м/с. Это часто повторяющаяся скорость в период эксплуатации. Циклическая нагрузка от вихревого возбуждения и связанное с ней количество циклов нагружения могут быть важны для расчета конструкции.

Критическая скорость ветра для возникновения вихревого возбуждения рассчитывается по формуле

$$V_{кр}^{в.в.} = \frac{H_{эф} n_i}{S_t}, \quad (1)$$

где  $H_{эф}$  – эффективная высота поперечного сечения пролетного строения с учетом пронизаемости барьерных и перильных ограждений;  
 $n_i$  – собственная частота  $i$ -й формы изгибных колебаний в вертикальной плоскости;  
 $S_t$  – число Струхала, которое зависит от формы поперечного сечения, конфигурации перильных, барьерных ограждений и определяется на основании экспериментальных данных.

### 1.2. Изгибно-крутильный и срывной флаттер

Изгибно-крутильный флаттер – это нарастающие с течением времени изгибно-крутильные колебания, вызванные несовпадением аэродинамического центра конструкции (точки приложения аэродинамических сил) с его центром тяжести.

Чтобы конструкция была восприимчива к этому виду аэроупругой неустойчивости, должны быть выполнены следующие условия:

- конструкция или ее существенная часть должна иметь удлиненное поперечное сечение (подобное плоской пластине) с соотношением размеров  $B/H > 4$ ;

- собственная частота крутильных колебаний должна быть меньше двойного значения первой изгибной собственной частоты:  $n_{кр} < 2n_{изг}$ ;

- ось кручения должна быть параллельна плоскости пластины и перпендикулярна направлению потока, а центр вращения должен располагаться не ближе, чем на расстоянии  $B/4$  от наветренного края пластины.

Если одно из условий не выполняется, то сооружение не подвержено аэроупругой неустойчивости типа дивергенция или флаттер.

В некоторых случаях конструкция может быть подвержена аэроупругой неустойчивости типа срывной флаттер – крутильным колебаниям, возникающим вследствие периодического срыва вихрей. Особенности срывного флаттера:

- ограниченная амплитуда, зависящая от скорости потока, собственной крутильной частоты и демпфирующих свойств конструкции при крутильных деформациях;

- частота колебаний при срывном флаттере близка к одной из собственных крутильных частот конструкции;
- критическая скорость возникновения срывного флаттера, как правило, ниже критической скорости изгибно-крутильного флаттера.

### 1.3. Дивергенция

Дивергенция – статическая аэроупругая неустойчивость, возникающая под действием аэродинамического момента, скручивающего конструкцию. Критическую скорость возникновения дивергенции можно оценить по формуле

$$V_{кр. див.} = \frac{2 \cdot GI}{\rho H^2 \frac{\partial C_m}{\partial \alpha}}, \quad (2)$$

где  $GI$  – крутильная жесткость поперечного сечения;

$C_m$  – коэффициент аэродинамического момента:

$$C_m = \frac{M}{0,5 \cdot \rho V^2 H^2}, \quad (3)$$

где  $M$  – аэродинамический момент на единицу длины конструкции;

$\rho$  – плотность воздуха;

$H$  – высота балки жесткости конструкции;

$\alpha$  – угол натекания потока (рис. 1).

### 1.4. Галомирование

Галомирование – автоколебания поперек потока, вызванные отрицательным аэродинамическим демпфированием. Этот вид аэроупругих колебаний характерен для тел с некруглыми поперечными сечениями, а также для вант, покрытых наледью. В случае галоирования нарастание амплитуды колебаний конструкции увеличивается при повышении критической скорости.

Для первичной оценки предрасположенности конструкции к галоированию используют следующий критерий:

$$C_{Lift}^\alpha + C_{Drag} < 0, \quad (4)$$

где  $C_{Drag}$  – коэффициент сопротивления.

$$C_{Lift}^\alpha = \frac{\partial C_{Lift}}{\partial \alpha} \quad (5)$$

Сечение динамически неустойчиво, если отрицательный наклон кривой подъемной силы больше ординаты кривой лобового сопротивления. Аэродинамические характеристики принимаются на основе статических испытаний в аэродинамической трубе.

Критическую скорость, при которой возникает такая аэроупругая неустойчивость, как галоирование, можно оценить по формуле

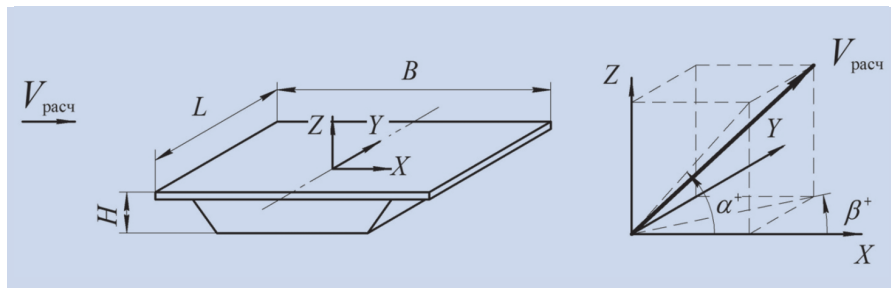


Рис. 1. Взаимное расположение системы координат, пролетного строения и вектора скорости

$$V_{кр} = - \frac{2m\delta n_i}{(C_{Lift}^\alpha + C_{Drag})\pi\rho B_0}, \quad (6)$$

где  $m$  – погонная масса конструкции;

$\delta$  – логарифмический декремент колебаний

(при  $V=0$ );

$n_i$  – собственная частота конструкции;

$B_0$  – характерный размер конструкции;

$\alpha$  – угол натекания потока.

Если значения критической скорости галоирования и вихревого возбуждения близки, то вероятно взаимное влияние этих аэродинамических явлений друг на друга. В таком случае необходимо проводить специальные исследования.

### 1.5. Бафтинг

Бафтинг – аэроупругая неустойчивость, возникающая у конструкции, находящейся в турбулентном потоке или вихревом следе за другой конструкцией. Колебания по типу бафтинг наблюдаются, если мостовые сооружения расположены близко друг к другу. Влияние бафтинга можно не рассматривать, если расстояние между мостовыми конструкциями превышает 10-кратное значение ширины центрального пролета моста.

Если в одной плоскости находятся две практически идентичные пролетные конструкции, разделенные только в продольном направлении зазором менее 1 м, то силу ветра с наветренной стороны можно рассчитывать так же, как для составной конструкции. В других случаях необходимо исследовать взаимное влияние мостов.

## 2. Ландшафтная аэродинамическая труба

Это специализированная установка для исследований аэроупругой устойчивости мостов. Корректное физическое моделирование аэродинамики большепролетных мостов накладывает ряд требований к масштабу и точности изготовления модели моста, а также к аэродинамической трубе, которая воспроизводит ветровой поток. В России

множество самолетных аэродинамических труб, но они предназначены для испытаний летательных аппаратов и не подходят для испытаний уникальных мостов.

### 2.1. Требования к специализированным аэродинамическим трубам

Наиболее важное требование – закрытая рабочая часть с определенными габаритами.

Длина рабочей части должна превышать 15 м. Это обеспечивает возможность моделирования приземного пограничного слоя, учет которого столь важен при испытаниях архитектурных объектов.

Ширина рабочей части должна превышать 8 м. Это дает возможность проводить испытания макетов в крупном масштабе с хорошей детализацией, а также воспроизводить отдельные элементы прилегающего ландшафта. Важно выдержать правильный масштаб модели моста. В противном случае может быть нарушен один из самых важных критериев физического моделирования – критерий Рейнольдса, что наряду с низкой детализацией макета приведет к получению недостоверных данных о нагрузках.

Чтобы были удовлетворены все требования к аэродинамическим испытаниям большепролетных мостов, в Крыловском центре построена ландшафтная аэродинамическая труба. Особенно экспериментальной установки:

- аэродинамическая труба с закрытой рабочей частью;
- сечение рабочего участка – прямоугольник  $11 \times 2,3$  м;
- длина рабочего участка 18 м;
- скорость набегающего потока – до 14 м/с;
- шаг регулировки скорости потока 0,1 м/с;
- возможность моделировать приземный пограничный слой.

В полу ландшафтной аэродинамической трубы расположен поворотный круг (рис. 2) диаметром 10 м с возмож-

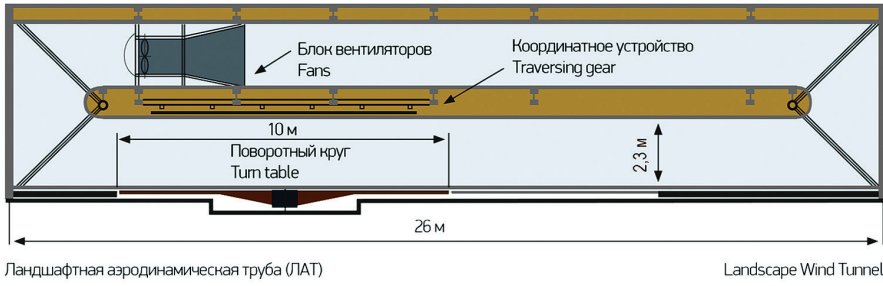


Рис. 2. Продольный разрез ландшафтной аэродинамической трубы

ностью поворота на любой угол, точность поворота  $0,2^\circ$ . На круге размещаются исследуемые модели, при повороте модели относительно потока воспроизводятся все возможные направления ветра. В потолке установки расположено трехкоординатное устройство для перемещения измерительных зондов и сканирования потока вокруг исследуемого макета. Область перемещения координатного устройства  $10 \times 10 \times 2$  м, точность позиционирования  $0,5$  мм.

Благодаря внушительным размерам рабочего участка (рис. 3) и особо точному оборудованию в ландшафтной аэродинамической трубе проводятся исследования на крупных макетах, при этом моделируется столь важный приземный пограничный слой. Таким образом существенно повышается точность получаемых в эксперименте ветровых нагрузок, что особенно важно при проектировании уникальных мостов, стадионов, небоскребов.

**2.2. Моделирование приземного слоя атмосферы**

Известно, что в приземном слое атмосферы скорость ветра, температура, турбулентные характеристики и другие параметры имеют сложное распределение по высоте. Важно правильно выбрать профиль скорости в зависимости от местоположения исследуемого объ-

екта, от типа подстилающей поверхности и других факторов.

В мировой практике существуют различные подходы к описанию профиля скорости с использованием степенных и логарифмических законов. Для различных типов местности, в зависимости от размеров элементов ландшафта (растительного покрова, сооружений и пр.) определяются значения параметров в указанных законах. Во всех случаях выделяется некоторый слой воздуха толщиной  $\delta$ , прилегающий к поверхности земли, в котором задается закон изменения скорости по высоте. На высоте, большей  $\delta$ , скорость воздушного потока считается неизменной.

Один из вариантов описания профиля скорости в атмосферном приземном слое с помощью степенного закона следующий:

$$V = V_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^\alpha, \tag{7}$$

где  $V$  – скорость воздушного потока на высоте  $z$  от поверхности земли;  
 $V_1$  – скорость воздушного потока на высоте  $z_1$  от поверхности земли;  
 $\alpha$  – показатель степени.

В качестве  $z_1$ , как правило, принимается стандартная высота установки приборов для измерения скорости на метеорологических станциях (10 м), соответственно,  $V_1$  определяется как ско-



Рис. 3. Поперечный разрез ландшафтной аэродинамической трубы

рость ветра  $V_1$  на данной высоте. Кроме того, под  $z_1$  может приниматься толщина приземного слоя  $\delta$  и соответствующая ей скорость  $V_1$ .

Другой способ задания профиля скорости – логарифмический закон, представленный выражением (8). Для применения данного закона требуется знать значение параметра шероховатости подстилающей поверхности  $z_0$ , зависящего от типа местности:

$$V = V_{10} \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_{10}}{z_0}}, \tag{8}$$

Профили скорости, построенные по степенному и логарифмическому закону, при одинаковой толщине приземного слоя отличаются друг от друга степенью наполненности. Для сравнительной оценки профилей были построены кривые, соответствующие степенному и логарифмическому законам (рис. 4). На графике для открытого типа местности видны различия значений, полученных при использовании этих двух подходов в описании профиля скорости. Чем «полнее» профиль скорости, тем больше будет величина ветровой нагрузки со стороны потока на модель.

На практике моделировать приземный атмосферный слой в аэродинамической трубе можно только в том случае, если имеется закрытая рабочая часть

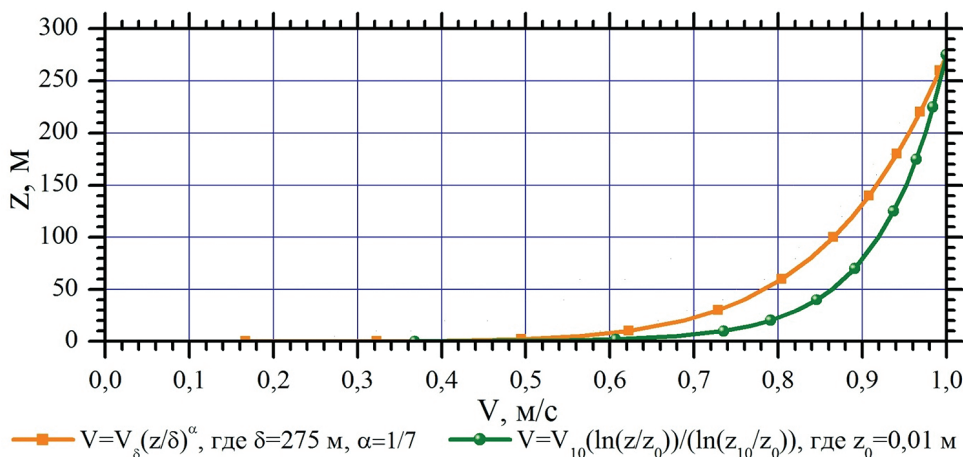


Рис. 4. Сравнение степенного и логарифмического закона для профиля скорости в приземном слое для открытой местности

длиной более 15 м, снабженная элементами дискретной шероховатости. В большинстве своем данные устройства представляют собой вертикальные вихрегенераторы в виде конусов и расположенные на полу элементы шероховатости в виде призм (рис. 5). Моделирование приземного слоя атмосферы во время эксперимента позволяет существенно повысить точность получаемых в эксперименте ветровых нагрузок, что особенно важно при проектировании уникальных сооружений.

В заключение подчеркнем следующее. По мере появления новых конструкционных материалов и развития технологий строительства в мире возводятся все более масштабные сооружения. Для их успешного проектирования и строительства требуются моделирование и учет внешних ветровых нагрузок на новом уровне. Модельные эксперименты необходимо проводить в специализированных аэродинамических трубах.

**Литература**

1. Казакевич М. И. Аэродинамика мостов. М.: Транспорт, 1987. 240 с.

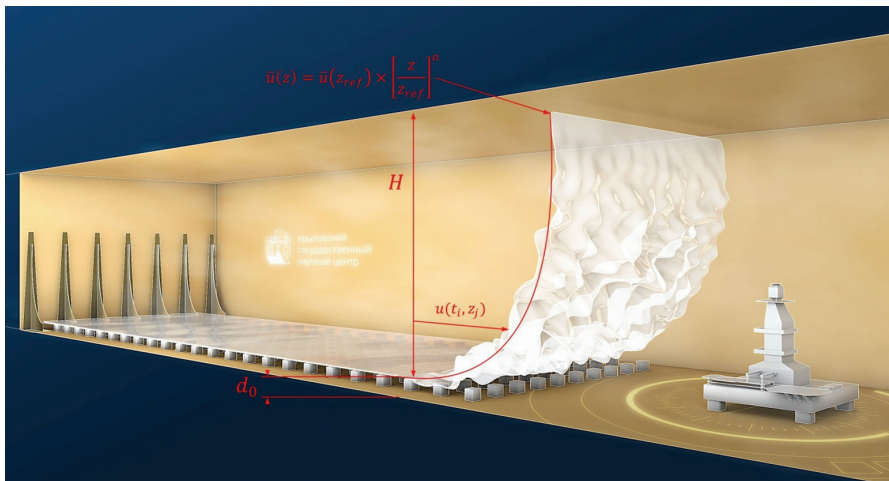


Рис. 5. Профиль скорости в приземном атмосферном слое

2. Реттер Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика. М., 1984. 294 с.  
 3. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения: пер. с англ. М.: Стройиздат, 1984. 258 с.  
 4. Девнин С. И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций. Л.: Судостроение, 1983. 331 с.  
 5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: М.: Дрофа, 2003. 840 с.  
 6. Гузеев А. С., Короткин А. И., Соловьев С. Ю.

Об одном из методов определения числа Струхаля при обтекании контуров с фиксированными точками отрыва потока // Морской вестн. 2012. № 2. С. 97–100.  
 7. Гузеев А. С., Корнилов Д. В., Короткин А. И. и др. Аэродинамические испытания высотных зданий и сооружений // Высотные здания. 2015. № 1. С. 102–105.  
 8. Soloviev S. Yu., Zagorodnikov M. A. Krylov's tunnel vision // The Naval Architect. 2015, Sept. P. 80–82.




## VI МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

# АРКТИКА: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

**ФОРМИРОВАНИЕ АРКТИЧЕСКОЙ ПОВЕСТКИ**

**ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ ГОДА**

Декабрь 2016, Санкт-Петербург

**АРКТИЧЕСКАЯ ЗОНА РФ:**

- Транспортная система
- Энергетические проекты
- Системы связи
- Промышленные технологии
- Экономические механизмы
- Научный и кадровый потенциал
- Природопользование
- Народы Севера
- Международное сотрудничество

# forumarctic.com