

КУРУЛУШ
СТРОИТЕЛЬСТВО
CONSTRUCTION

Маруфий А.Т., Калыков А.С.

**ИМАРАТТАРДЫН ЖАНА КУРУЛМАЛАРДЫН
АЭРОСЕРПИЛГИЧТИГИ**

Маруфий А.Т., Калыков А.С.

АЭРОУПРУГОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

A.T. Marufiy, A.S. Kalykov

AEROELASTICITY OF BUILDINGS AND STRUCTURES

УДК: 624.073.02

Бул илимий макалада колдонмо механика бөлүмүнүн имараттардын жана курулмалардын серпилгичтигин тастыктаган негизги көрсөткүчтөр каралган. Аба ылдамдыгына, басымына жараша имараттардын туруктуулугу, алардын климаттык зоналарына, абанын согуу катышына, басымына, имараттын бийиктиги жана формасынан болгон каттамы белгиленген. Призма жана цилиндр формасындагы имарат жана курулуштардын айлануу өтүү кезиндеги шамал агымынын жүрүү айырмачылыгы көрсөтүлгөн. Аба агымынын ылдамдыгын жогорулатуу кезинде пайда болуучу куюн баиталмасынын негизинде, имарат жана курулуштардын басымдын айырмачылыгы аркылуу термелүү процессинин алып келүү учагы белгиленген. Рейнольдс санына ылайыктуу аба агымдарынын аймактык сан эсебиндеги бөлүү ыкмалары берилди. Имарат жана курулмалардын каттуулук бекемдигинен болгон байланыш көрсөтүлгөн. Аэродинамикалык, конструктивдик ыкмалар аркылуу имарат жана курулмалардын демпфирлөө, басыңдатуу маселесин чечүүнүн варианттары камтылган.

Негизги сөздөр: аэросерпилгичтик, ламинардуулук, турбуленттик, куюн баиталмасы, Рейнольдс саны, мезгил, өзүнө тийиштүү кыймылдоо, Карман жолчосу, Струхаль саны, демпфирлөө.

В научной статье рассмотрены основные показатели раздела прикладной механики – аэроупругость зданий и сооружений. Детально рассмотрены поведение зданий и сооружений при ветровых нагрузках, в зависимости от скоростей напора воздуха, определяемых от климатической зоны, коэффициента пульсации, высоты и формы объекта. Показана разница поведения ветровых потоков при обтекании зданий и сооружений с призматическими и цилиндрическими формами. При увеличении скоростей воздушных потоков и разнице давлений, срывов также возникает вихревое возбуждение, что приводит к изгибно-колебательным процессам из плоскости зданий и сооружений. В зависимости от числа Рейнольдса возможно выделение нескольких определенных характерных областей воздушных

потоков. Указаны зависимости жесткостных характеристик зданий и сооружений на аэроупругость объекта в целом. Приведены варианты решений по аэродинамическому и конструкционному демпфированию для различных инженерных сооружений.

Ключевые слова: аэроупругость, ламинарность, турбулентность, вихревое возбуждение, число Рейнольдса, период, собственные колебания, дорожка Карман, числа Струхалья, демпфирование.

The scientific article discusses the main indicators of applied mechanics-aeroelasticity of buildings and structures. The behavior of buildings and structures under wind loads is considered in detail, depending on the air pressure rates determined from the climatic zone, ripple coefficient, height and shape of the object. The difference in the behavior of wind flows during flow around buildings and structures with prismatic and cylindrical shapes is shown. With an increase in air flow velocities and a difference in pressure and disruptions, vortex excitation also occurs, which leads to bending-vibrational processes from the plane of buildings and structures. Depending on the Reynolds number, it is possible to isolate several specific characteristic areas of air flow. The dependences of the stiffness characteristics of buildings and structures on the aeroelasticity of the object as a whole are indicated. The solutions for aerodynamic and structural damping for various engineering structures are given.

Key words: aeroelasticity, laminarity, turbulence, vortex ex citation, Reynolds number, period of natural oscillations, Karman path, Strouhal numbers, damping.

Введение. В практике проектирования зданий и сооружений проектировщики в целом решают масштабные задачи, начиная с актуальных проектных решений, то есть с соответствия объемно-планировочных решений, как требованиям действующих норм по градостроительству и архитектуре, так и эстетических требований Заказчика, вплоть до цвета окраски фасадных решений. Проектные решения основных несущих конструкций зданий и сооружений, в итоге

складываются суммированием требований по инженерно-геологическим изысканиям, со сбора нагрузок [1] в соответствии с технологическим заданием, размерами пролетных требований. При этом одним из факторов назначения жесткостных характеристик конструктивным элементам является также требуемые данные по аэроупругости зданий и сооружений.

Цель исследования. Определение требуемых и рекомендуемых методов решения по аэродемпфированию объектов при изучении аэроупругости зданий и сооружений.

Раздел прикладной механики, изучающий взаимодействие упругой системы с потоком газа (с воздухом) называется аэроупругостью. В строительстве данный раздел рассматривается при воздействии воздушных потоков, ветра на мосты, высотные здания и сооружения [2].

При этом указанный раздел состоит из трех основных частей:

1) Законы инерции – классическая динамика, к ним относятся решение дифференциальных уравнений, определение скоростей, ускорений, производных;

2) Упругость – свойство внутренней структуры тела линейно противодействовать внешним силовым факторам;

3) Законы аэродинамики – законы течения потока газа, ламинарность, турбулентность [3];

В строительстве практически все виды сооружений и зданий можно отнести к основным двум формам конструктивных решений. Это здания и сооружения с призматическими или цилиндрическими формами. К призматическим формам зданий и сооружений можно отнести: призмы, кубы, пластины, квадратные формы, треугольные или многоугольные фигуры, а к цилиндрическим: цилиндры, конусы, яйцевидные, круглые в плане здания и сооружения.

Поток воздуха при обтекании зданий и сооружений с призматическими формами находит точки отрыва (границы), при цилиндрических формах точки отрыва отсутствуют.

В цилиндрических формах зданий, круглых в плане опасно – вихревое возбуждение. Вихревое возбуждение характерно для цилиндрических зданий склонных к изгибным колебаниям из плоскости воздействия. Это в первую очередь башни, мачты, трубы металлические и кирпичные. Данное явление создается следующим образом: при малых скоростях ветра поток воздуха плавно обтекает форму и опасных явлений не возникает, поток смыкается за формой тихо и спокойно – ламинарное течение (рис. 1).

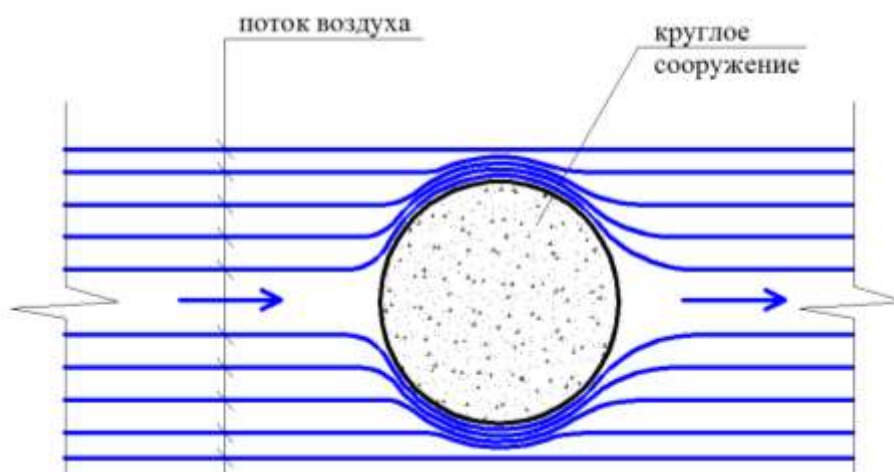


Рис. 1. Ламинарный поток воздуха.

Но при повышении скоростей потока воздуха, растет число Рейнольдса [4] и начинают возникать парные вихри (рис. 2).

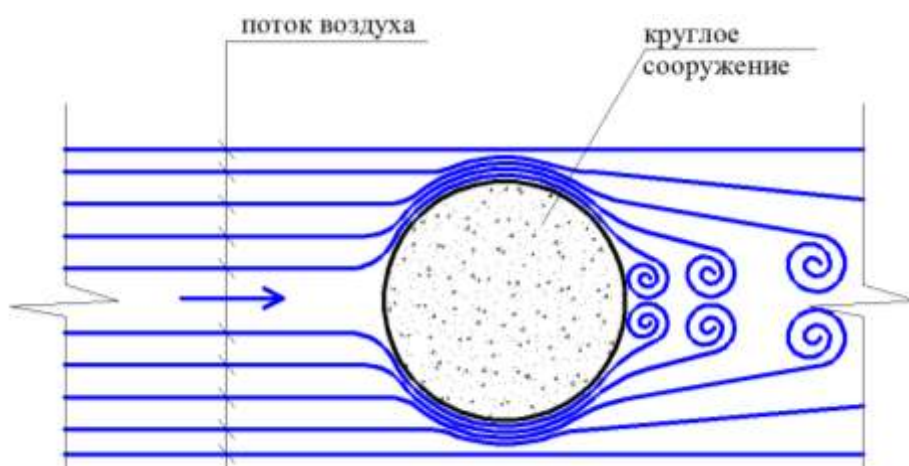


Рис. 2. Зарождение парных вихрей.

При увеличении скорости потока начинается вихревое возбуждение, то есть за конструкцией скорость так велика, что поток не успевает сомкнуться, возникает так называемый вихревой след (рис. 3).

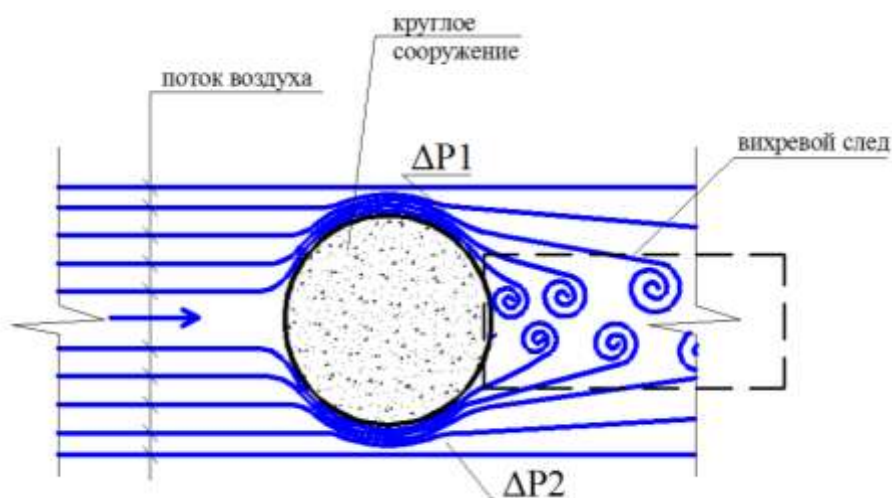


Рис. 3. Периодический срыв вихрей.

Но когда скорость потока большая, возникают вихри, в том случае, когда частота срыва вихрей совпадает с частотой собственных колебаний сооружения, начинается вихревое возбуждение. При этом вихри срываются не одновременно, они срываются попеременно. Это приводит к разнице давлений, дельта P_1 и дельта P_2 на правой и левой сторонах сооружения и объект начинает свой колебательный процесс из плоскости. Разница срыва вихря его с левой стороны от вихря с правой стороны приводит к периоду, который приближается к периоду собственных колебаний по первой частоте колебаний здания или сооружения

и начинается регулярный автоколебательный процесс. Если система имеет достаточно мощный запас сопротивления, то колебания гасятся, но при их недостаточности – к примеру: не достаточной жесткости элементов и рассеивания энергии возникает процесс резонанса [5]. В таких случаях система может дойти до стадии разрушения, раскачавшись до предельных состояний всего сооружения, с исчерпанием прочностных характеристик.

При этом процесс, когда по очереди вихри срываются и гаснут, а также образуется след в виде дорожки, называется вихревой дорожкой Карман (рис. 4).

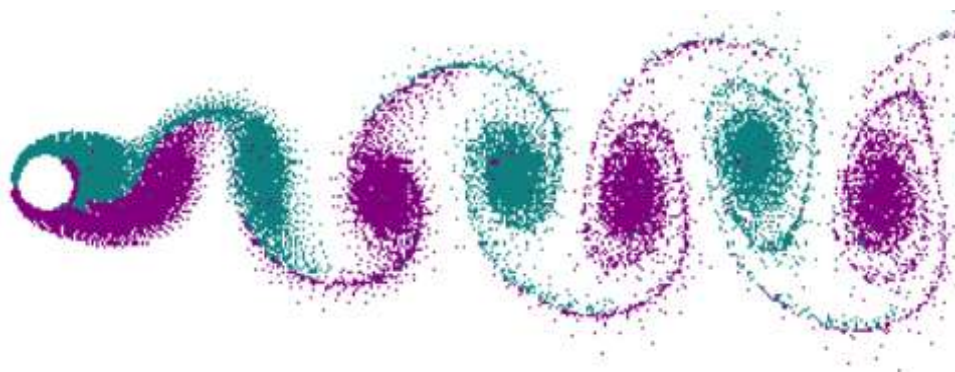


Рис. 4. Вихревая дорожка.

Названа вихревая дорожка в честь Теодора Кармана, при этом она проявляется при ограниченных значениях числа Рейнольдса. Между шириной дорожки и расстоянием между соседними вихрями существует линейная зависимость.

Число Рейнольдса – это отношение сил инерции к силам трения.

$$Re = V_{(z)} * D / \eta \epsilon, \quad (1)$$

где Re – число Рейнольдса;

$V_{(z)}$ – скорость воздуха в зависимости от высоты сооружения;

D – линейный размер сооружения, диаметр;

$\eta_{(z)}$ – коэффициент кинематической вязкости;

$$\eta_{(z)} = \nu_{(z)} / \rho_{(z)}, \quad (2)$$

где $\eta_{(z)}$ – коэффициент вязкости;

$\nu_{(z)}$ – вязкость жидкости или газа;

$\rho_{(z)}$ – плотность жидкости или газа [6,7];

В зависимости от числа Рейнольдса, можно выделить области:

- число Рейнольдса равен 10 – поток ламинарный, плавный;
- число Рейнольдса равен 20 – поток еще ламинарный, но уже не устойчивый, образуются первые два стационарных вихря;
- число Рейнольдса равен 40 – вихри становятся не устойчивыми;
- число Рейнольдса равен 100 – попеременный срыв вихрей, образуется вихревая дорожка Кармана и так называемый ламинарный отрыв;
- число Рейнольдса равен 150-300 – поток становится турбулентным, отрыв вихрей уже нерегулярен;
- число Рейнольдса равен более 300 – преобладает периодический отрыв с частотой. На основную

частоту срыва налагаются турбулентные пунктуации потока;

- число Рейнольдса равен более 200000 – пограничный слой вокруг цилиндра полностью становится турбулентным, скорость так велика, что вокруг трубы начинается бурление воздуха;
- число Рейнольдса равен более 5000000 – транс критическая область. Коэффициент сопротивления при больших скоростях падает в несколько раз и называется это явление кризисом сопротивления;

Явление характерное для призматических тел, опасное в физическом смысле, называется галлопирование, от слова галоп. Оно характерно для любых сооружений и конструкций, имеющих остrokонечный выступ (рис. 5). В призматических сооружениях свободной обтекаемости не может быть.

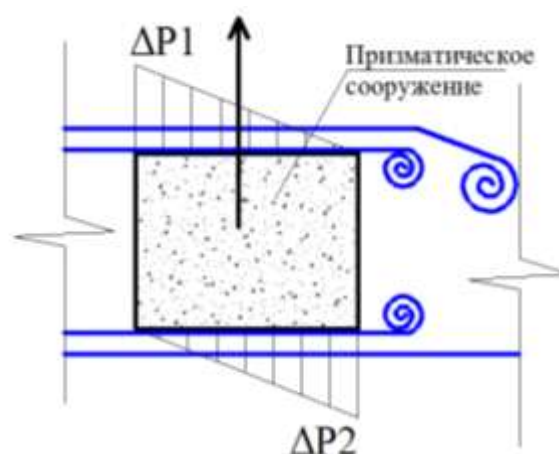


Рис. 5. Призматическое тело.

Возникают давления по внешним сторонам, которые приводят к изгибу сооружения и срыву вихрей, что может привести к явлению захвата частоты собственных колебаний.

Совпадение собственной частоты колебаний сооружений с частотой срыва вихрей и образование дорожки Кармана, называется явлением захвата частоты собственных колебаний.

Это явление управляется постоянным коэффициентом. При этом коэффициент для каждой геометрической фигуры всегда постоянен. Например: двутавровая балка имеет поперек сечения $k=0,14$, а вдоль стенок $k=0,12$. Все цифры по данному коэффициенту всегда меньше $k=0,2$. Самой обтекаемой фигурой является – цилиндр и $k=0,2$. Эти числа называются числами Струхала. В целом это отношение собственной частоты сооружения и диаметра к скорости потока.

Зная характерный размер сооружения, зная собственную частоту колебания, и зная число Струхала, мы можем определить ту скорость – v , при которой возникает явление захвата колебаний сооружения. Эту скорость называют критической скоростью. Необходимо отметить, что каждое сооружение имеет собственную критическую скорость.

Здания имеют бесконечное количество степеней свободы и частоты зданий, следовательно, имеют неопределенное количество критических скоростей. Но самая важная – первая частота является самой энергопотребляющей. Зная среднее и расчетное давление ветра в данном регионе, можно определить предельную скорость для определенного здания или сооружения.

Здания возможно разделить по срокам службы на три категории:

- 1) Сооружения сроком службы 50-100 лет;
- 2) Здания сроком 25-50 лет;
- 3) Здания до 25 лет;

В зависимости от категорий здания назначаются требуемые коэффициенты по надежности.

Для повышения собственной частоты сооружения, требуется повесить его жесткость, а для этого необходимо увеличивать диаметр сооружения (для цилиндрических зданий).

Явление при изгибно-крутильным случае, наиболее сложное при анализе и называется оно флаттером. Для флаттера (в переводе – дрожание, вибрация), аэродинамически невыгодными конструкциями являются такие конструктивные элементы как – балки

и плитные конструкции с характерными гранями. Одной из причин разрушения токийского моста, как раз является флаттер, вызванный этими конструктивными элементами. Ветровой поток вызвал в мостовой конструкции токийского моста, не только колебательные движения, но и крутильные колебания по всем направлениям.

Для надежности конструкций необходимо развязывать конструкции, а висячие мосты недостаточно развязаны. Огромное количество раскреплений существенно повышает жесткость конструкций. Увеличивать критическую скорость возможно специальными инструментами. Например: аэродинамические гасители в виде пластин и тросов, которые обвивают трубу или же приваркой металлических полос. Использование труб с витыми круговыми спиралями также дает положительный результат. Указанные методы разрушают однородный ветровой поток. Применение металлических пластин в виде хаотичных приваренных к трубе, также не позволяют разгоняться воздуху и создают искусственную шероховатость. Обвитие тросами приводит к разрушению однородного потока. При этом надо учитывать и обратный процесс в определенных условиях с созданием шероховатости.

Демпфирование делится на две основные части – аэродинамическое и конструкционное [8]. Аэродинамическое демпфирование – это выгодное или не выгодное расположение формы. При анализе аэродинамической неустойчивости важную роль играет коэффициент потери гибкого сооружения, обусловленной суммой конструкционных и аэродинамических видов демпфирования.

Конструкционное демпфирование складывается из внутренних потерь материала конструкций. Это трение кристаллической решетки на уровне молекулярных соединений, люфты болтовых соединений, упругость основания. Они не дают войти в резонанс здание или сооружение. Использование податливых оснований и амортизаторов являются одним из методов по рассеиванию энергии.

Выводы. При проектировании зданий и сооружений детальное изучение задач аэроупругости является одной из приоритетных частей проекта и напрямую влияет на общую сметную стоимость всего строительства. А для высотных зданий и сооружений в виде мачт, труб – учет требований по аэроупругости является одним из главных в инженерном проектировании.

Литература:

1. Государственный стандарт «Строительные нормы и правила» 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия / Госстрой России. (Центр научных исследований, Институт строит. Конструкций им. В.А. Кучеренко. Госстрой СССР). - М.: ГУП ЦПП, 2001. - 44 с.
2. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. (Центр научных исследований, Инст. строит. Конструкций им. В.А. Кучеренко. Госстрой СССР). - М.: Стройиздат, 1978.
3. Симиу Э. Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. - М.: Стройиздат, 1984. - 360 с.
4. Иванов К.Ф. Сурков С.В. Механика жидкости и газа. Часть 1. - Одесса: ОГПУ, 1995. - 119 с.
5. Сологаев В.И. Гидравлика (механика жидкости и газа). - Сибирь: Изд. СибАДИ, 2010. - 64 с.
6. Ковальногов Н.Н. Основы гидравлики. / Учебное пособие. - Ульяновск: УВАУ ГА, 2004. - 86 с.
7. Ларионов В.М., Филипов С.Е. Введение в гидродинамику. - Казань: КГУ, 2010. - 108 с.
8. Рекомендации по новым технологиям, материалам и работкам компании «The Japan Society of Seismic Isolation – JSSI» (Японское общество сейсмической изоляции). - Алматы, 2018.