
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(НИУ МГСУ)

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР СтаДиО»
(НИЦ СтаДиО)

УТВЕРЖДАЮ:

Ген. директор АО НИЦ СтаДиО

/ Белостоцкий А.М. /

« » 2024 г.



УТВЕРЖДАЮ:

Директор НТГП НИУ МГСУ

/ Кабанцев О.В. /

2024 г.



СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЕТРОВЫХ И СНЕГОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

NUMERICAL MODELLING OF WIND AND SNOW ACTIONS

Редакция 1.0

Москва – 2024 г.

Содержание

1	Область применения.....	1
2	Нормативные ссылки	1
3	Термины, определения, обозначения и сокращения	1
3.1	Термины и определения	1
3.2	Обозначения и сокращения	3
4	Рекомендации по разработке и требования к численным моделям.....	6
4.1	Моделирование турбулентных потоков.....	6
4.2	Граничные и начальные условия.....	7
4.3	Детализация и форма расчетной области	8
4.4	Пространственная и временная дискретизация численных моделей	11
4.5	Требования к численным схемам	14
4.6	Требования к программным комплексам	14
5	Методики моделирования ветровых нагрузок	14
5.1	Контроль параметров набегающего потока	15
5.2	Интегральные ветровые нагрузки и выбор опасных направлений ветра ...	17
5.3	Позонные средние ветровые нагрузки	20
5.4	Пульсационная составляющая ветровой нагрузки.....	23
5.5	Пиковые ветровые нагрузки.....	23
5.6	Аэродинамические коэффициенты давлений	26
6	Методика моделирования снеговых нагрузок	26
6.1	Особенности снегонакопления на покрытиях зданий и сооружений	27
6.2	Численное моделирование снегонакопления и снегопереноса	28
6.3	Анализ и интерпретация результатов моделирования.....	29
7	Методики оценок аэроупругих эффектов	33
7.1	Определение аэродинамических характеристик для оценок аэроупругих явлений	33
7.2	Оценка возможности возникновения галопирования	36
7.3	Дивергенция	37
7.4	Вихревое возбуждение	38
7.5	Прямое связанное моделирование аэроупругих явлений	38
8	Принципы комплексного моделирования	40
8.1	Требования и возможности	41
8.2	Разработка рекомендаций по результатам комплексного моделирования	42
	Приложение А (рекомендуемое) Верификация и валидация численных моделей	43

Введение

Настоящий стандарт разработан в развитие положений СП 20.13330 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» в части численного моделирования ветровых и снеговых воздействий на основе численных схем решения трёхмерных уравнений движения жидкости и газа с современными моделями турбулентности, реализованными в лицензионных программных комплексах вычислительной гидрогазодинамики. В стандарте представлены методики численного моделирования ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции, методика численного моделирования снеговых нагрузок, методики оценок аэроупругих эффектов.

Физическое моделирование в аэродинамической трубе имеет как преимущества: исторически развитая методология эксперимента, малое количество упрощающих гипотез, высокое временное разрешение искомых величин, так и недостатки: возможные отклонения от автомодельности, низкое пространственное разрешение искомых величин, ограниченный учет окружающей застройки и рельефа местности. Особенные трудности возникают с физическим моделированием таких явлений, как снегонакопление и обледенение. Для моделирования этих процессов необходимы специализированные климатические аэродинамические трубы.

Альтернативный физическому моделированию подход – численное моделирование – имеет широкие возможности: учет окружающей застройки и рельефа местности, моделирование климатических эффектов, переноса веществ, двухстороннего связанного поведения ветрового потока и конструкции, наглядная визуализация результатов в миллионах точек и т.д. Однако неоднозначный выбор математических гипотез, граничных условий и численных схем требует высокой квалификации исследователей для получения надежных результатов.

Комплексные исследования на основе физического и численного моделирования способны во многом нивелировать недостатки каждого из подхода и дать синергический эффект.

Все три вышеперечисленных подхода к моделированию ветровых и снеговых воздействий применяются в российском строительстве, однако нормативные требования существуют только для физического моделирования в аэродинамических трубах. Введение настоящего стандарта обусловлено назревшей необходимостью регламентировать требования к численному и комплексному моделированию ветровых и снеговых воздействий, верификации и валидации численных моделей аэродинамики. Процесс включения численного моделирования в строительные нормативные документы поэтапно происходит во многих технически развитых странах.

Настоящий стандарт разработан авторским коллективом Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НИУ МГСУ) и Научно-исследовательского центра СтаДиО (научный руководитель – д.т.н., профессор, академик РААСН А.М. Белостоцкий – разделы 1-3, Приложения А-Б; О.С. Горячевский – разделы 4, 5, 8, Приложения А, Г; Н.А. Бритиков – разделы 4, 6, 8, Приложение А; И.Ю. Негрозова – разделы 7, 8, Приложения Б-Г).

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает требования и рекомендации к численному и комплексному (совместному численному и физическому) моделированию ветровых и снеговых воздействий, учитываемых при расчетах напряженно-деформированного состояния динамики, устойчивости и прочности (механической безопасности) зданий, сооружений и отдельных конструкций.

1.2 Настоящий стандарт устанавливает рекомендации по верификации и валидации численных моделей, специфичных для строительной аэродинамики.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте приводятся ссылки на следующие российские нормативные документы:

ГОСТ Р 56728-2015 Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции

ГОСТ Р 59625-2022 Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила расчета и подтверждения аэроупругой устойчивости

ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия

СП 35.13330.2011 Мосты и трубы

СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов (сводов правил) в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный документ, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого документа с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил целесообразно проверить в Федеральном информационном фонде стандартов.

3 Термины, определения, обозначения и сокращения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **математическая модель:** Основные закономерности и связи, присущие изучаемому явлению и выраженные в виде формул, уравнений, наборов правил или соглашений, записанных в математической форме.

3.1.2 **численная модель:** Реализованная на основе численных методов математическая модель конкретной задачи.

3.1.19 снегоимитатор (снегоподобный материал): Рассыпчатый (дисперсный) материал, имитирующий снег при физическом моделировании снегонакопления или только снегоуноса. Выбирается из соображений адекватного моделирования сальтации.

3.1.20 численно моделируемый коэффициент формы: Коэффициент формы снеговых нагрузок, непосредственно получаемый из результатов математического моделирования. Не применяется при обосновании механической безопасности.

3.1.21 физически моделируемый коэффициент формы: Коэффициент формы снеговых нагрузок, непосредственно получаемый из результатов физического моделирования. Не применяется при обосновании механической безопасности.

3.1.22 расчётный коэффициент формы: Коэффициент формы снеговых нагрузок, определяемый по результатам синтеза нормативных схем и результатов физического и / или математического моделирования. Применяется при обосновании механической безопасности.

3.1.23 аэроупругость: Проявления взаимного влияния ветрового потока и перемещений конструкции.

3.1.24 аэроупругие явления: Эффекты, возникающие в результате взаимного влияния ветрового потока и перемещений конструкции или элемента конструкции.

3.1.25 аэроупругая неустойчивость: Процесс, при котором отклонения конструкции в ветровом потоке носят нарастающий во времени характер под действием аэродинамических сил.

3.1.26 направление ветра: Угол в горизонтальной плоскости между вектором скорости набегающего потока и некоторой начальной осью.

3.1.27 угол атаки ветра: Угол в вертикальной плоскости между вектором скорости набегающего потока и некоторой начальной осью.

3.1.28 вихревое возбуждение: Интенсивные колебания конструкции поперек потока в узком диапазоне скоростей ветра, возникающие при совпадении одной из собственных частот колебаний конструкции с частотой срыва вихрей Кармана.

3.1.29 галопирование: Аэроупругие автоколебания конструкции поперек потока, вызванные отрицательным аэродинамическим демпфированием, возникновение которого обуславливается нестационарной аэродинамической подъемной (поперечной) силой при определенной ориентации конструкции относительно направления потока.

3.1.30 дивергенция: Аэроупругие отклонения конструкции, возникающие в результате воздействия аэродинамического момента, который скручивает конструкцию, уравновешенную в общем случае упругим сопротивлением кручению.

3.2 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения и сокращения с соответствующими определениями, за исключением Приложений:

A – коэффициент, зависящий от степени когезии (сцепленности частиц снега), с/м;

$B_{сеч}$ – характерный поперечный размер сечения, м;

C – концентрация снега в воздухе вблизи поверхности снегоотложения, кг/м³;

$T_{+(-)}$ – период времени для отложения (уноса) снега, с;
 $U_{empty}(z)$ – скорость ветра в пустом домене в месте расположения исследуемого объекта, м/с;
 $U_{inlet}(z)$ – скорость ветра на входе в расчетную область (исходный профиль), м/с;
 $V_{cr,i}$ – критическая скорость возникновения вихревого возбуждения для i -ой изгибной собственной частоты конструкции, м/с;
 V_{div} – критическая скорость возникновения дивергенции, м/с;
 V_g – критическая скорость возникновения галопирования, м/с;
 V_m – средняя скорость потока, м/с;
 $V_{max}(z_e)$ – максимально возможная скорость ветра для места строительства на уровне z_e , м/с;

a_g – критерий галопирования;
 b – характерный поперечный размер сечения, м;
 c_e – аэродинамический коэффициент средних давлений;
 $c_{e,+(-)}$ – аэродинамический коэффициент пиковых давлений;
 f_x, f_y, f_r – поэтажные погонные ветровые нагрузки, кН/м;
 f_{F_L} – частота срыва вихрей, Гц;
 f_i – i -ая изгибная собственная частота колебаний конструкции, Гц;
 k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²;
 k_v – коэффициент, учитывающий эффект захвата собственной частоты колебаний;
 $l(x,y)$ – кривая торцов перекрытия, м;
 $m_{e,i}$ – эквивалентная погонная масса для i -й изгибной собственной формы, кг/м;
 q_g – поток обмена массой между воздухом и снеговым покровом, кг/м²с;
 q_+ – поток отложения, кг/м²с;
 q_- – поток уноса, кг/м²с;
 u_* – скорость трения, м/с;
 u_t – пороговая скорость трения, м/с;
 u_τ – скорость трения, м/с;
 w_f – средняя скорость оседания снега, м/с;
 y^* – безразмерное расстояние от первого узла сетки до стенки;

ψ – степень загромождения расчетной области, %;
 γ_f – коэффициент надежности по нагрузке;
 δ_U – степень деформации скорости набегающего потока, %;
 δ_s – коэффициент конструкционного демпфирования;
 $\theta_{+(-)}$ – коэффициенты обеспеченности;
 μ – расчётный коэффициент формы;
 μ_{nm} – численно моделируемый коэффициент формы;
 ν_a – кинематическая вязкость воздуха, м²/с;
 ρ_a – плотность воздуха, кг/м³;
 ρ_s – насыпная плотность снега, кг/м³;
 σ_p – стандарт пульсаций давления, Па;
 τ_w – местное напряжение сдвига на поверхности, Па;

модель турбулентности WALE. LES – ресурсоемкий подход, реализуемый в многопроцессорных вычислительных кластерах.

4.1.3.3 Гибридный RANS-LES подход, когда у стенок и в невозмущенных областях решаются уравнения RANS, а в остальных областях – LES. Разделение уравнений в расчетной области производится специальными функциями. Недопустимо использовать устаревшую модель DES. Нестационарная вихреразрешающая постановка позволяет напрямую определить статистические характеристики искомых величин. Подход требует меньших вычислительных затрат, чем LES, и реализуем даже на мощных однопроцессорных системах.

4.1.4 Моделирование скоростей и турбулентных характеристик в пограничном слое возле стенок может проводиться как напрямую, так и с помощью специальных функций стенки [3-4], откалиброванных на экспериментальных данных. Активация функций стенки происходит при разных значениях безразмерного расстояния от первого узла сетки до стенки y^+ :

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu_a}, \quad (4.1)$$

где y – расстояние от центра конечного объема до стенки,

u_τ – скорость трения,

ν_a – кинематическая вязкость (значение см. в Приложении Г).

При $y^+ > 30$ применяются функции стенки, при $y^+ < 5$ – пристеночная область разрешается напрямую. Значений $5 \leq y^+ \leq 30$ (буферная зона) и $y^+ > 300$ следует избегать ввиду возможного появления нефизичных эффектов в результатах.

4.1.5 Использование двумерных и квази-двумерных постановок (толщиной в один конечный объем) допустимо только для предварительного анализа, т.к. явление турбулентности исключительно трехмерно. Результаты численного моделирования в двумерных постановках могут приводить к нефизичным эффектам в результатах (например, существенно завышать величины пульсаций).

4.1.6 Численное моделирование аэродинамики допустимо проводить в уменьшенном масштабе (1:50-1:200) для обеспечения лучшего функционирования моделей турбулентности и выполнения условий дискретизации пограничного слоя по y^+ .

4.2 Граничные и начальные условия

4.2.1 Для поверхностей земли, воды, зданий и сооружений следует использовать граничное условие «стенки с прилипанием» (все компоненты скорости равны 0). Для учета влияния мелких элементов, придающих поверхностям шероховатость, допускается использовать специальные функции стенки [3].

4.2.2 В качестве граничного условия на «входе» потока в расчетную область следует использовать профиль скорости, соответствующий решаемой задаче (см. разделы 5-7). Кинетическая энергия турбулентности в RANS подходах может быстро диссипировать при продвижении потока от «входа» к исследуемому объекту, поэтому необходимый уровень турбулентности следует обеспечивать прямым учетом окружающей застройки.

4.2.3 «Вход» потока в расчетную область должен быть размещен на расстоянии не менее R от ближайшей окружающей застройки, где R – радиус круга вокруг исследуемого объекта, внутри которого учитывается окружающая застройка. Если окружающая застройка не учитывается или отсутствует, то «вход» должен

то рекомендуется расширить радиус учитываемой окружающей застройки для их учета.

4.3.3 Рекомендуется максимально упрощать геометрию удаленной окружающей застройки (до призматических форм). Это значительно понизит размерность задачи и улучшит сходимость при незначительном отклонении от реальной аэродинамики объекта.

4.3.4 Ближайшая окружающая застройка должна быть детализирована выше, чем удаленная, но ниже, чем исследуемый объект. Это значительно понизит размерность задачи и улучшит сходимость при незначительном отклонении от реальной аэродинамики объекта.

4.3.5 Рельеф окружающей местности следует учитывать, если:

4.3.5.1 Его вклад в аэродинамику сопоставим с влиянием окружающей застройки (например, холмистая местность с низкоэтажной застройкой).

4.3.5.2 Объект расположен на крутом склоне (например, на морском побережье).

4.3.5.3 В качестве критерия крутизны рельефа, которую следует учитывать, можно ориентироваться на условие $\Delta h \geq H/5$, где Δh – перепад рельефа на характерном размере объекта в плане, H – высота объекта.

4.3.5.4 В случаях, когда даже незначительный перепад рельефа в зоне стилобата образует переменную этажность (например, 1-ый этаж с одной стороны объекта и 2-ой – с другой), следует локально учесть этот перепад в модели.

4.3.6 Наиболее предпочтительная форма расчетной области с плоским рельефом – прямоугольный параллелепипед (см. рисунок 4.1а).

Наиболее предпочтительная форма расчетной области с учетом развитого рельефа – цилиндр (см. рисунок 4.1б). Для избежания нефизичного ускорения или замедления ветровых потоков, обусловленного сужением или расширением расчетной области, следует обеспечить близкие значения площади поверхностей, на которых задаются граничные условия «входа» и «выхода» (допускается разница не более, чем на 5%).

4.3.7 Как правило, не следует учитывать влияние на аэродинамику зеленых насаждений и других проницаемых для ветра тел, носящих временный характер. Однако при необходимости рекомендуется это делать с помощью модели пористого тела [6].

4.3.8 Для определения ветровых нагрузок на высотные здания особую важность имеет детализация фасадов (см. рисунок 4.2). При этом малые элементы стилобата и кровли могут быть упрощены.

Для определения ветровых нагрузок на низкие сооружения со значительными размерами в плане (спортивные, культурные и т.п.) важна детализация как фасадов, так и стилобата и покрытия. Однако проницаемые для ветра элементы ограждений, мостиков и т.п. рекомендуется не учитывать.

В любом случае следует детализировать геометрию, исходя из необходимости учесть элементы, оказывающие основное влияние на аэродинамику объекта, при обеспечении высокого качества конечно-объемной сетки (КО-сетки) и рациональной размерности задачи (см. раздел 4.4).

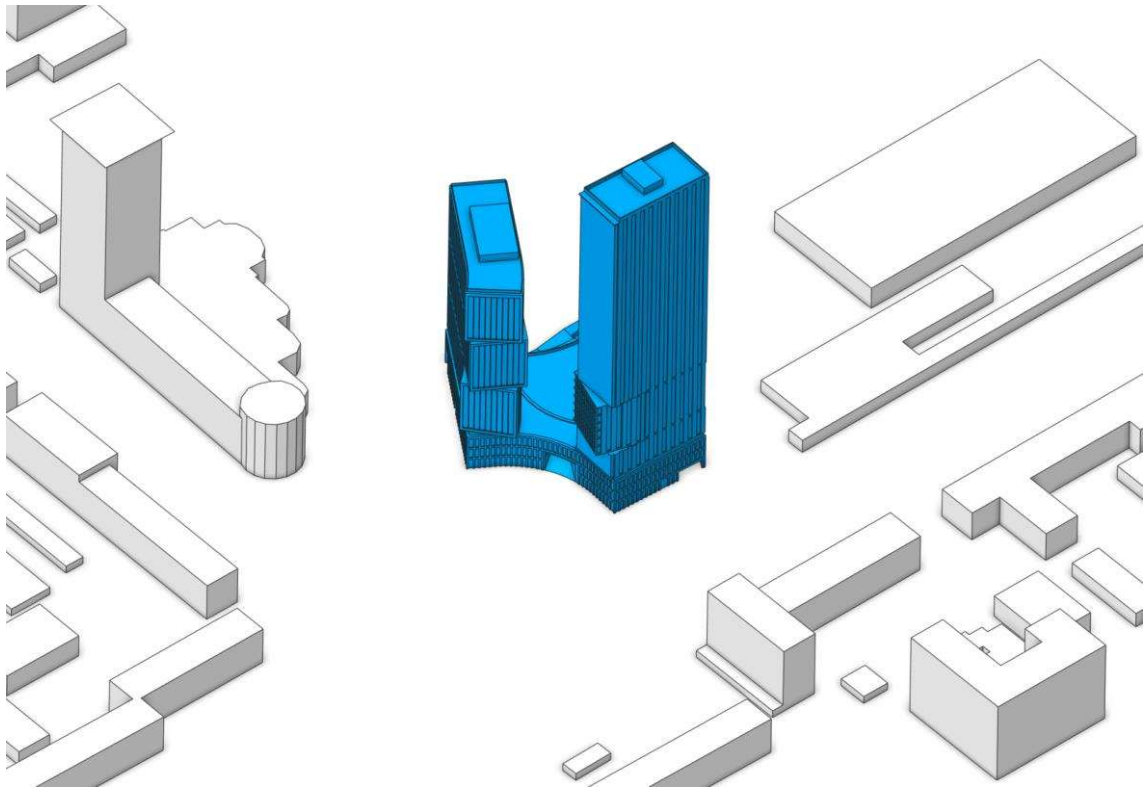


Рисунок 4.2 – Пример детализации исследуемого здания (синим) и окружающей застройки (белым)

4.4 Пространственная и временная дискретизация численных моделей

4.4.1 Рекомендуется использовать пространственную дискретизацию уравнений методом конечных объемов (МКО). МКО является наиболее универсальным и зарекомендовавшим себя методом в промышленных приложениях аэродинамики.

4.4.2 При построении КО-сеток необходимо для каждого конечного объема обеспечить выполнение условия:

$$\psi_{OQ} = \min_i \left(\frac{\bar{S}_{f,i} \cdot \bar{e}_{c,i}}{|\bar{S}_{f,i}| |\bar{e}_{c,i}|}, \frac{\bar{S}_{f,i} \cdot \bar{e}_{f,i}}{|\bar{S}_{f,i}| |\bar{e}_{f,i}|} \right) \geq 0,15, \quad (4.3)$$

где ψ_{OQ} – метрика ортогонального качества КО;

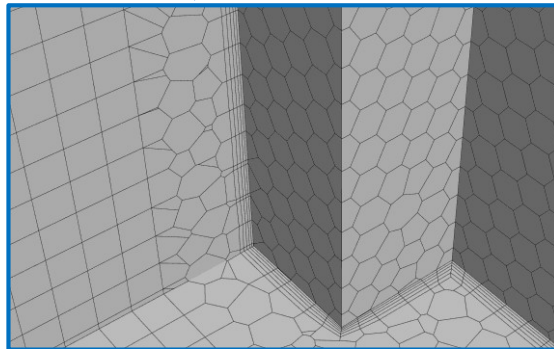
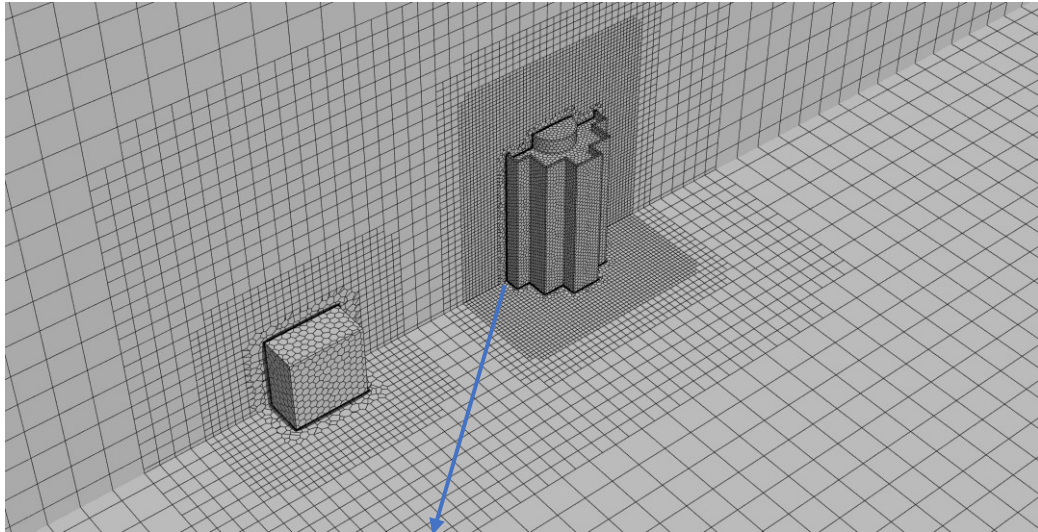
$\bar{S}_{f,i}$ – вектор нормали к i -ой грани КО;

$|\bar{e}_{c,i}|$ – вектор, проведенный из центра КО к центру соседнего КО через i -ю грань;

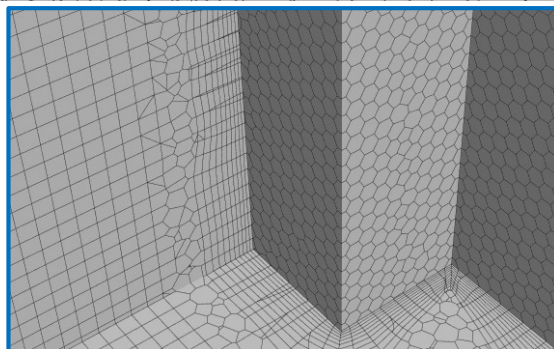
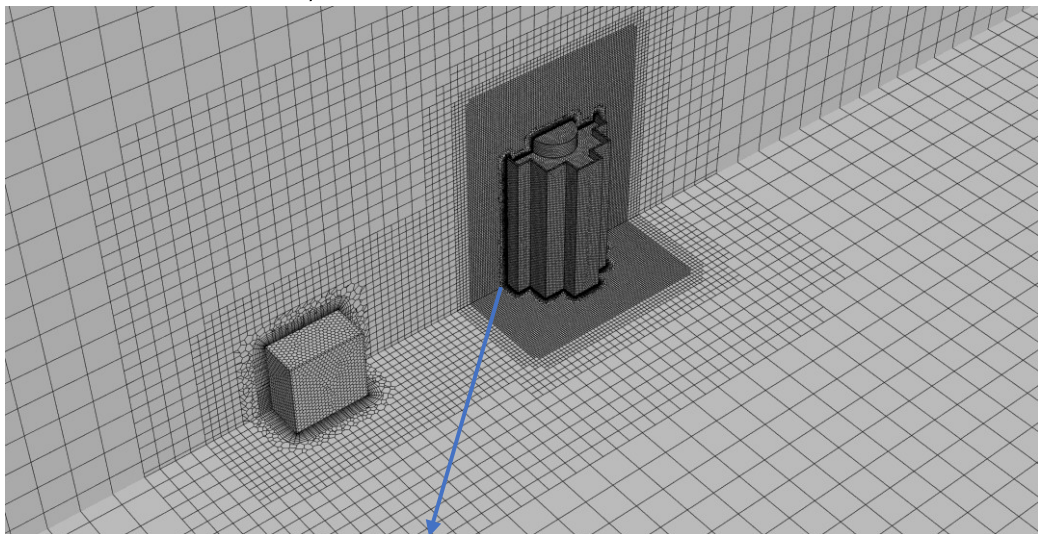
$|\bar{e}_{f,i}|$ – вектор, проведенный из центра КО к центру i -ой грани КО;

Недопустимо присутствие даже единичных сильно «скошенных» конечных объемов ($\psi_{OQ} \leq 0,15$). Следует стремиться к максимизации количества конечных объемов правильной формы (кубы, равносторонние тетраэдры и т.п.).

4.4.3 При построении КО-сеток допустимо использовать некомфортные сетки с интерфейсным соединением, обеспечивающим интерполяцию. Однако интерфейсы следует размещать вдали от исследуемого объекта и следить за отсутствием значимых дефектов решения возле них. Такой подход в построении КО-сеток может уменьшить количество КО при увеличении их ортогонального



а) КО-сетка для RANS подхода



б) КО-сетка для LES или RANS-LES подходов

Рисунок 4.3 – Примеры КО-сеток для разных подходов. Здание в центре – исследуемое. Абсолютные размеры КО условны

рамках расчета на вихревое возбуждение). При определении пиковых ветровых нагрузок учитываются амплитуды давлений, но корреляция между пульсациями набегающего потока и пульсациями давлений при срыве вихрей принята упрощенно консервативной.

Приведенные в разделе методики численного моделирования ветровых нагрузок представлены в двух вариантах:

Стационарный. Основан на решение RANS-уравнений в квазистационарной постановке. Позволяет напрямую определить средние значения ветровых давлений, сил и моментов. Оценка амплитуды пульсаций давления для пиковых ветровых нагрузок проводится на основе полуэмпирической методики. Стационарный подход рекомендуется в большинстве случаев ввиду доступных требований к вычислительным ресурсам и достаточной точности.

Нестационарный. Основан на решении LES или гибридных RANS-LES уравнений в нестационарной постановке. Позволяет напрямую определить как средние значения ветровых давлений, сил и моментов, так и их амплитудно-частотный спектр. Нестационарный подход рекомендуется для случаев, когда необходимо определение амплитудно-частотного спектра ветровых нагрузок. Ветровые нагрузки, определенные по результатам Нестационарного подхода, следует считать более надежными, чем по результатам Стационарного подхода.

5.1 Контроль параметров набегающего потока

5.1.1 Численное моделирование скоростей ветра и турбулентных характеристик в приземной зоне, как правило, происходит с использованием специальных функций стенки, откалиброванных на экспериментальных данных для определенного типа задач и приведенных в соответствие с параметрами используемой модели турбулентности. Информация об используемых функциях стенки должна быть приведена в документации соответствующего программного комплекса. Применение функций стенки приводит к деформации набегающего профиля ветра при его прохождении через расчетную область.

5.1.2 Степень деформации скорости набегающего потока должна быть оценена по результатам моделирования аэродинамики пустой расчетной области:

$$\delta_U = \frac{|U_{empty}(z) - U_{inlet}(z)|}{U_{inlet}(z)} \cdot 100\%, \quad (5.1)$$

где $U_{empty}(z)$ – скорость ветра в пустом домене в месте расположения исследуемого объекта;

$U_{inlet}(z)$ – скорость ветра на входе в расчетную область (исходный профиль).

5.1.3 Для получения достоверных результатов ветровых нагрузок степень деформации скорости набегающего потока должна быть ограничена:

$$\delta_U \leq 20\% : 5m \leq K_s z \leq 10m;$$

$$\delta_U \leq 5\% : K_s z > 10m,$$

где K_s – масштабный коэффициент (геометрический масштаб 1: K_s).

5.1.4 Для снижения погрешности численного моделирования может быть определен коэффициент коррекции ветровых нагрузок:

5.2 Интегральные ветровые нагрузки и выбор опасных направлений ветра

5.2.1 Численное моделирование ветровых нагрузок на несущие конструкции объекта должно проводиться для представительного набора направлений ветра (с шагом не более 30°). Обязательно учитывать направления, перпендикулярные фасадам (при наличии прямых стен). Допускается учитывать симметрию исследуемого объекта и окружающей застройки для сокращения моделируемых направлений ветра.

5.2.2 Выбор наиболее опасных направлений ветра для зданий, сооружений и отдельных конструкций основывается на анализе интегральных ветровых нагрузок: F_X , F_Y , F_R , F_Z , M_X , M_Y , M_R , M_Z (средней составляющей для Стационарного варианта методики и суммарных для Нестационарного). Для выбранных направлений ветра следует привести подробные схемы ветровых нагрузок по характерным зонам (см. раздел 6.3), которые удобно использовать при обосновании механической безопасности.

Для низких сооружений со значительными размерами в плане (спортивные, культурные и т.п.) наиболее значимы интегральные ветровые силы F_X , F_Y , F_R и F_Z . Следует учитывать, что положительные значения F_Z могут оказаться разгружающими для конструкций и, следовательно, не опасными. Поэтому выбор опасных направлений по подъемной силе следует проводить, учитывая конструктивные особенности объекта, в т.ч. используя картины распределения давлений по покрытию.

Для башенных сооружений (высотные жилые и офисные здания, отели, флагштоки и т.п.) наиболее значимы интегральные опрокидывающие моменты M_X , M_Y , M_R . Если здание дополнительно существенно ассиметрично в плане, то также значим крутящий момент M_Z .

В любом случае выбор наиболее значимых интегральных ветровых нагрузок должен основываться на понимании конструктивных особенностей объекта.

При наличии деформационных швов, полностью разделяющих сооружение на блоки, следует определять и анализировать интегральные ветровые нагрузки на каждый блок по отдельности.

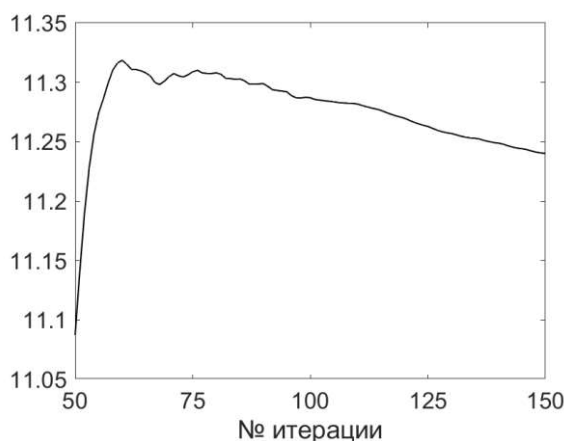
5.2.3 Направления осей X , Y для интегральных ветровых нагрузок должны быть характерными для сооружения (как правило, сонаправлены строительным осям). При наличии расчетной конечноэлементной модели объекта для определения напряженно-деформированного состояния, рекомендуется выбирать направление осей X , Y аналогично.

Расположение начала координат влияет на значения интегральных моментов: M_X , M_Y , M_R и M_Z . Положение начала координат по высоте следует назначать на нулевой отметке. Положение начала координат в плане важно только при анализе M_Z и его следует назначать в центре тяжести вертикальных поверхностей сооружения.

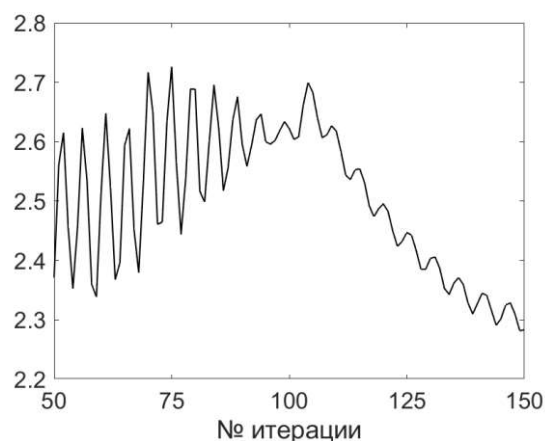
5.2.4 Функции вычисления интегральных сил и моментов присутствуют во всех промышленных программных комплексах CFD. Эти функции учитывают вклад статического давления, направленного по нормали к поверхностям, и напряжения сдвига, направленного по касательной к поверхностям. Для большинства сооружений вклад напряжений сдвига незначителен и может быть проигнорирован. Однако полученные с помощью встроенных функций значения интегральных нагрузок не учитывают масштаб модели, деформацию профиля и избыточное

Когда ни один из сценариев сходимости не реализуется (см. рисунок 5.3), то следует увеличить количество итераций. Итерационная сходимость обычно достигается за 100-300 итераций, в противном случае следует проверить качество сетки и настройки численных схем.

В некоторых случаях контрольная величина может меняться от итерации к итерации очень медленно с некоторым трендом (см. рисунок 5.3а). Имея ввиду, что ожидаемое установившееся значение будет незначительно отличаться от текущих, то допускается принимать такой расчет за сошедшийся.



а) медленное снижение контрольной величины



б) итерационные отклонения на ниспадающем тренде

Рисунок 5.3 – Примеры недостаточной сходимости контрольных величин

5.2.6 Для Нестационарного варианта методики необходимо вычислять значимые для сооружения интегральные нагрузки (формулы 5.3 - 5.4) на каждом временном шаге расчета. Достаточная сходимость по интегральным нагрузкам достигается при выходе решения на установившиеся колебания (см. рисунок 5.4). Интегральные нагрузки могут иметь широкий спектр частот, что затрудняет визуальную диагностику установившегося режима колебаний. Для надежного выявления установившегося режима следует на каждом временном шаге вычислять среднее и среднее квадратичное отклонение интегральных нагрузок:

$$\bar{F}(t_i) = \frac{1}{i-m} \sum_{j=m+1}^i F(t_j); \quad (5.5)$$

$$\hat{F}(t_i) = \sqrt{\frac{1}{i-m+1} \sum_{j=m+1}^i [F(t_j) - \bar{F}(t_i)]^2}, \quad (5.6)$$

где $F(t_i)$ – значение интегральной нагрузки на i -ом шаге времени;

m – число первых отбрасываемых итераций, для которых решение ещё не вышло на установившийся колебательный процесс.

При использовании непостоянного временного шага следует использовать обобщенные формулы для вычисления статистических величин.

Сходимость можно считать достаточной, если статистические характеристики колеблются в ограниченном диапазоне ($\pm 10\%$).

Итоговые статистические и частотные характеристики интегральных нагрузок необходимо определять на основе данных достаточно длинного интервала установившихся колебаний (охват минимум 5 самых длинных периодов).

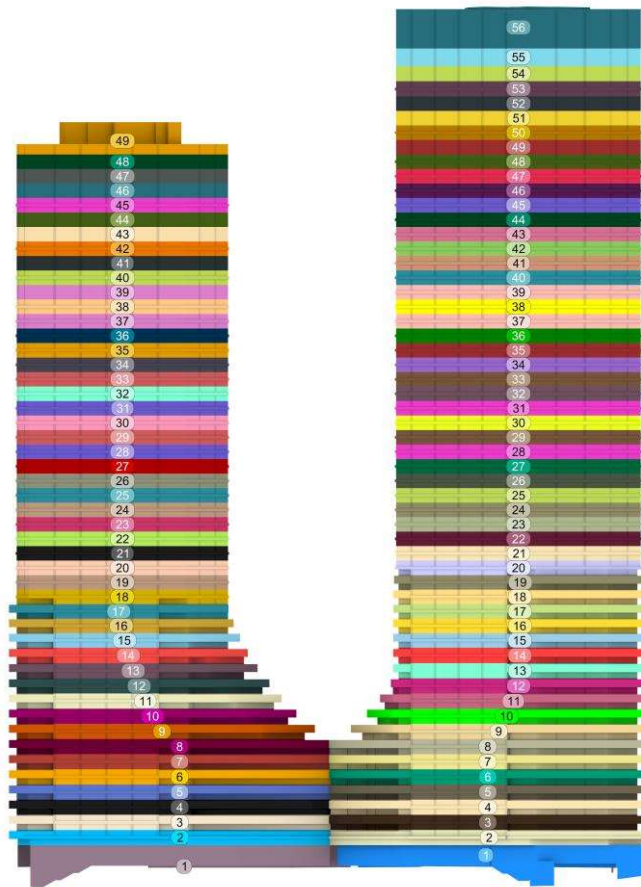
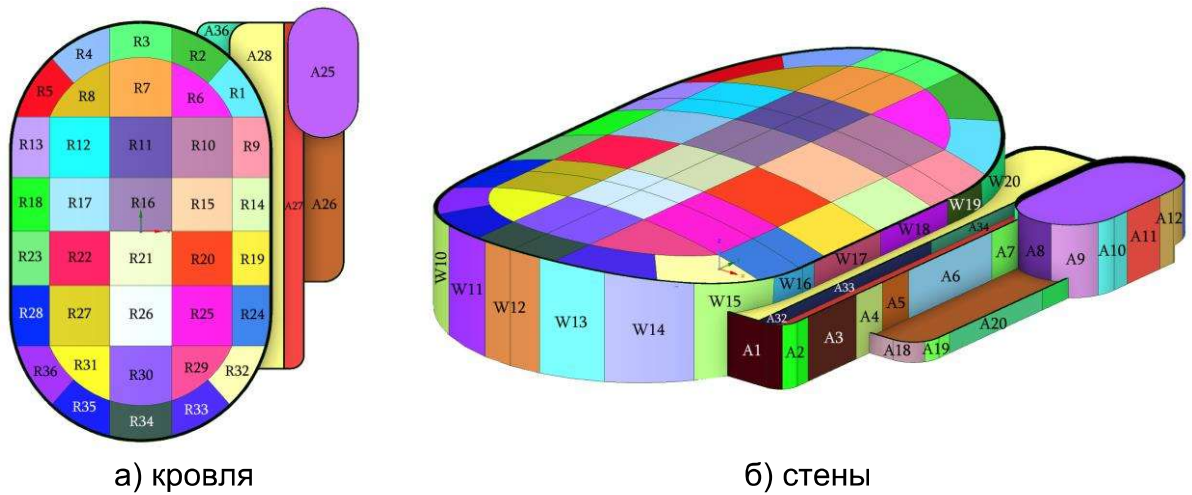


Рисунок 5.5 – Пример зонирования высотного здания



а) кровля б) стены
Рисунок 5.6 – Пример зонирования низкого сооружения сложной формы

5.3.3 Для каждой зоны сбора аэродинамических нагрузок средние составляющие ветровых давлений определяются усреднением по площади:

$$\Delta P_{zone} = \frac{1}{S_{zone}} \iint_{S_{zone}} K_{F,cor} \Delta P dS, \quad (5.7)$$

где S_{zone} – площадь зоны сбора аэродинамических нагрузок, m^2 .

расчета, оценивать сходимость и вычислять средние по времени значения в соответствии с принципами и требованиями, изложенными в 5.2.6.

5.4 Пульсационная составляющая ветровой нагрузки

5.4.1 Для определения отклика сооружения или отдельных конструкций на пульсационную составляющую ветровой нагрузки необходимо определить спектр ветрового воздействия (см. рисунок 5.8).

5.4.2 Определение спектра ветрового воздействия рекомендуется проводить на основе Нестационарного варианта методики с нестационарными граничными условиями на «входе», воспроизводящими модели натурального спектра набегающего потока [11].

5.4.3 В связи с высокой вычислительной ресурсоемкостью реализации п. 5.4.2 допускается применять упрощенные методики из СП 20.13330 и [12-14], используя среднюю составляющую ветровых нагрузок, полученную на основе Стационарного варианта методики.

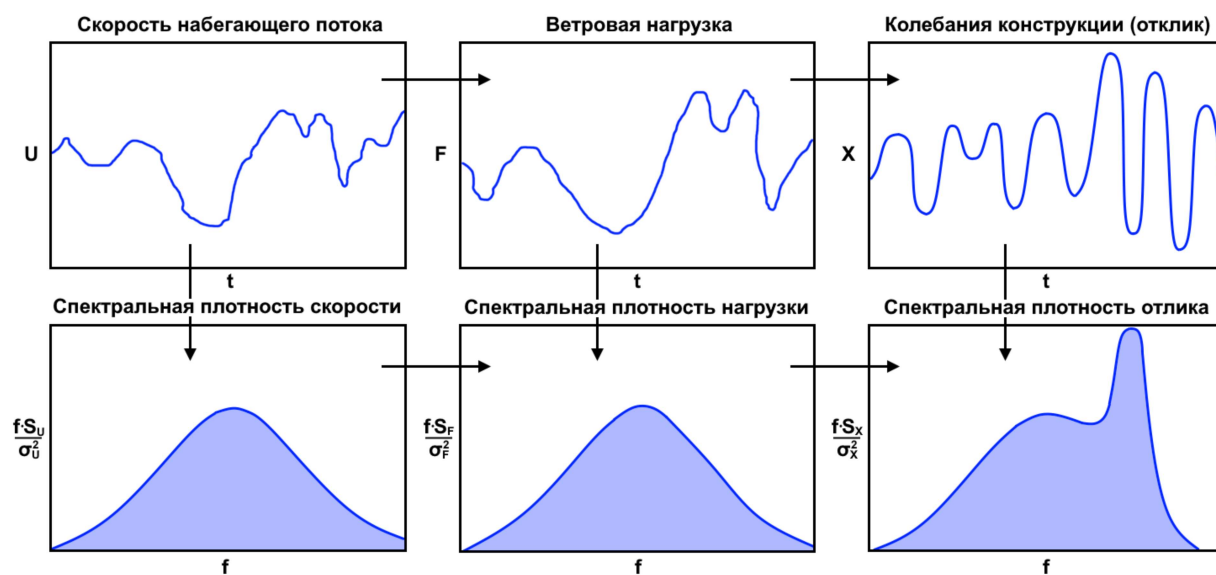


Рисунок 5.8 – Схема связей между скоростью набегающего потока, ветровой нагрузкой, динамическим откликом конструкции и соответствующими спектрами

5.5 Пиковые ветровые нагрузки

5.5.1 Численное моделирование пиковых ветровых давлений на ограждающие конструкции должно проводиться для представительного набора направлений ветра (с шагом не более 15°). Обязательно учитывать направления, перпендикулярные фасадам (при наличии прямых стен). Допускается учитывать симметрию исследуемого объекта и окружающей застройки для сокращения моделируемых направлений ветра.

5.5.2 Для Стационарного варианта методики на поверхностях объекта вычисляются поля статических давлений ΔP и кинетической энергии турбулентности k для каждого направления ветра.

Математически k на поверхностях равен 0, поэтому значения необходимо вычислять на небольшом расстоянии. В численных решениях $k \approx 0$ на поверхностях без применения функций стенок, которые отключаются при высокой дискретизации пограничного слоя ($y^+ \leq 5$). При более грубой дискретизации пограничного слоя ($y^+ \geq 30$) активируются функции стенки, а значения k на поверхностях вычисляются

$$\Delta\hat{P}(M, t_i) = \sqrt{\frac{1}{i-m+1} \sum_{j=m+1}^i [\Delta P(M, t_j) - \Delta\bar{P}(M, t_j)]^2}, \quad (5.13)$$

где $M(x, y, z)$ – точка на поверхности сооружения;

$\Delta P(M, t_i)$ – значение статического давления на i -ом шаге времени, Па.

При использовании непостоянного временного шага следует использовать обобщенные формулы для вычисления статистических величин.

Сходимость можно считать достаточной, если статистические характеристики колеблются в ограниченном диапазоне ($\pm 15\%$).

Итоговые статистические характеристики статических давлений ΔP необходимо определять на основе данных достаточно длинного интервала установившихся колебаний (охват минимум 5 самых длинных периодов).

5.5.7 На основе вычисленных в Нестационарном подходе значений среднего и среднего квадратичного отклонения статических давлений ΔP определяются пиковые ветровые давления с обеспеченностью 99.7% для нормального распределения:

$$\begin{aligned} \Delta P_+ &= [1 + \zeta(z_e)] (\Delta\bar{P} + 3\hat{P}); \\ \Delta P_- &= [1 + \zeta(z_e)] (\Delta\bar{P} - 3\hat{P}), \end{aligned} \quad (5.14)$$

5.5.8 В зонах отрыва и рециркуляции ветрового потока распределение вероятностей $\Delta P(t)$ может значительно отклоняться от нормального распределения. В таких случаях формулы 5.14 неприменимы, и пиковые ветровые давления следует определять на основе углубленного статистического анализа.

5.5.9 В Нестационарном варианте методики при интегрировании или усреднении ветровых давлений по площади ограждающих конструкций корреляция учитывается автоматически, поэтому дополнительно применять коэффициент корреляции из п. 11.2 СП 20.13330 недопустимо.

5.5.10 Для сокращения объема вычислений Нестационарный вариант методики может использоваться только для наиболее опасных направлений ветра, а Стационарный – для остальных направлений ветра.

5.5.11 Обычно размеры ограждающих конструкций малы, поэтому более информативными будут изополя и поэтажные эпюры огибающих пиковых ветровых давлений по всем исследуемым направлениям ветра.

Изополя огибающих:

$$\begin{aligned} \Delta P_{env,+} &= \max_j (\Delta P_{j,+}); \\ \Delta P_{env,-} &= \min_j (\Delta P_{j,-}), \end{aligned} \quad (5.15)$$

где j – направление ветра;

$\Delta P_{j,+(-)}$ – положительные (отрицательные) пиковые ветровые давления для j -го направления ветра.

Поэтажные эпюры получают усреднением изополей по высоте этажа.

5.5.12 Для представления результатов моделирования пиковых ветровых давлений в табличном виде необходимо разделить поверхности объекта на характерные зоны, для каждой из которых вычислить среднее, минимальное и максимальное по площади значения положительных и отрицательных пиковых ветровых давлений.

5.5.13 При обосновании механической безопасности объекта величины $\Delta P_{+(-)}$ и $\Delta P_{env,+(-)}$ следует использовать в качестве $w_{+(-)}$ по СП 20.13330.

основные уравнения модели, используемой для расчёта снеговых нагрузок, и закономерности снегопереноса, которые она описывает. В 6.3 содержатся указания по интерпретации результатов моделирования и созданию схем расчётного коэффициента формы μ с их использованием.

6.1 Особенности снегонакопления на покрытиях зданий и сооружений

6.1.1 Снеговая нагрузка на покрытиях зданий и сооружений образуется в процессе *снегонакопления* – явления формирования снегового покрова под действием ветра, тепловой энергии солнечного излучения и гравитации. Одним из главных факторов, влияющих на образование неравномерного распределения снега по покрытию, является ветровое воздействие, вызывающее *снегоперенос* [16]. В зависимости от диаметра переносимых ветром частиц выделяют три подпроцесса снегопереноса: *перекатывание*, *сальтацию* и *взвешивание* [17]. В общем случае для расчёта снеговой нагрузки необходимо моделировать сальтационный слой, поскольку он вносит наибольший вклад в перераспределение снега по покрытию (от 50% до 75%) [18-19].

6.1.2 Формирование неравномерно распределённого снегового покрова на покрытии под влиянием снегопереноса происходит в течение многих снегопадов на протяжении всего холодного сезона. Численное моделирование подобного процесса потребовало бы длительных расчётов с использованием двухфазного потока в нестационарной постановке (физическом времени), что на практике реализуемо только для научно-исследовательских задач и преимущественно модельных объектов. В инженерной практике допустимо моделировать снегоперенос в стационарной однофазной постановке [20-22]. В сочетании с рекомендациями нормативных документов результаты такого моделирования возможно использовать для назначения расчётного коэффициента формы μ .

6.1.3 При моделировании необходимо учитывать местную розу ветров, поскольку в действительности вклад в перераспределение снега вносят ветра с разных направлений обдува. В общем случае следует рассматривать не меньше 8 расчётных случаев: для преобладающего направления ветра, для противоположного ему, для двух перпендикулярных им и для четырёх повернутых на 45 градусов по отношению к ним. В случае если выбранные направления ветра не соотносятся в точности с формой исследуемого здания или сооружения (например, не параллельны осям симметрии, не перпендикулярны несущим стенам и пр.), необходимо отдельно рассмотреть дополнительные направления (см. рисунок 6.1). Полученные формы снегоотложений, выраженные в виде расчётного коэффициента формы μ , нужно рассматривать в качестве независимых нагрузжений.

6.1.4 Помимо различных направлений ветра также следует учитывать и его скорость. Экспериментально установлено, что снегоперенос возникает при скорости ветра вблизи покрытия в интервале 2-5 м/с [23]. В связи с этим моделирование необходимо проводить как минимум при 3 скоростных режимах: *слабом* (для получения распределения, близкого к равномерному), *среднем* (для умеренного снегопереноса) и *сильном* (для ярко выраженного снегопереноса вплоть до полного уноса снега с участков покрытия). Полученные распределения обобщаются для данного направления ветра в одну картину снегопереноса. Для широкого класса зданий и сооружений в качестве скоростей обдува рекомендуется использовать $U_{10,1} = 1$ м/с, $U_{10,2} = 3$ м/с, $U_{10,3} = 6$ м/с, где $U_{10,1}$, $U_{10,2}$, $U_{10,3}$ – скорость

A – коэффициент, зависящий от степени когезии (сцепленности частиц снега), с/м;

ρ_a – плотность воздуха (см. Приложение Г), кг/м³;

u_* и u_t – скорость трения и пороговая скорость трения соответственно, м/с.

В случае отсутствия экспериментальных данных для исследуемого объекта следует использовать следующие значения констант модели: $\rho_s = 300$ кг/м³, $C = 5$ г/м³, $w_f = 0.5$ м/с, $A\rho_a = 10^{-4}$ кг с/м⁴.

6.2.3 Скорость трения u_* определяется по следующей формуле:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_a}}, \quad (6.5)$$

где τ_w – местное напряжение сдвига на поверхности, Па.

В случае отсутствия экспериментальных данных для исследуемого объекта следует использовать значение пороговой скорости трения $u_t = 0.25$ м/с. Если скорость трения u_* в точке ниже пороговой, то наблюдается отложение снега ($q_g = q_+$), в противном случае – унос ($q_g = q_-$).

6.2.4 Для описания периодов времени, в течение которых снег преимущественно откладывается на покрытии здания и уносится с покрытия под действием ветра на протяжении всего наблюдаемого периода времени T , вводятся понятия периода отложения снега T_+ и периода уноса снега T_- . Тогда, с учётом гипотезы стационарности, выражение (6.1) приобретает вид:

$$H = \frac{q_+ T_+ - q_- T_-}{\rho_s}, \quad (6.6)$$

где H – расчетная высота снегового покрова, м;

Варьированием наблюдаемых периодов времени в интервалах $6 \text{ ч} \leq T_+ \leq 12 \text{ ч}$ и $30T_+ \leq T_- \leq 40T_+$, а также скоростного режима обдува (см. 6.1.4), получаются различные распределения высоты снегового покрова H по поверхности покрытия, среди которых выбираются наиболее неблагоприятные для механической безопасности исследуемого объекта.

6.2.5 Расчёт высоты снегового покрова выполняется по формуле (6.6) **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, в которую подставляются значения местных напряжений сдвига τ_w , вычисленные по результатам численного моделирования ветровых потоков над рассматриваемой поверхностью.

Подробное обоснование представленной методики приведено в [20].

6.3 Анализ и интерпретация результатов моделирования

6.3.1 Для использования в сочетании с рекомендациями нормативных документов и назначения расчётного коэффициента формы μ , применяемого при обосновании механической безопасности здания или сооружения, высоту снегового покрова необходимо выразить в виде численно моделируемого коэффициента формы μ_{nm} . Вычисление значений коэффициента μ_{nm} может проводиться одним из двух способов:

6.3.1.1 По определению, коэффициент формы выражается через отношение толщины снегового покрова на покрытии (H_{roof} , м) к толщине покрова на таком участке земли, где влияние снегопереноса мало (H_{ground} , м):

$$\mu_{nm} = H_{roof} / H_{ground}. \quad (6.7)$$

Такой способ требует либо создания достаточно большой расчётной области, либо моделирования пустой расчётной области при тех же характеристиках

$$\mu_{nm} = \mu_0 + \frac{q_+ T_+ - q_- T_-}{S_g} . \quad (6.10)$$

6.3.2 Выбор между формулами (6.7) и (6.10) следует делать в пользу наиболее неблагоприятного распределения значений численно моделируемого коэффициента формы по покрытию. Значение μ_0 подбирается итерационно из условия (6.8).

6.3.3 При разработке схем расчётного коэффициента формы необходимо учитывать результаты моделирования и рекомендации СП 20.13330. Должны быть соблюдены основные закономерности распределения снеговой нагрузки по покрытиям, приведённые в нормах.

6.3.3.1 Покрытие исследуемого объекта разбивается на участки, формы которых аппроксимируются примитивами, представленными в нормах. Снеговая нагрузка в пределах этих участков должна иметь следующий характер (см. Приложение Б к СП 20.13330 и рисунок 6.3):

- а) плоских и скатных – кусочно-постоянный (схемы Б.1, Б.4, Б.5);
- б) сводчатых и близких к ним по очертанию при $f/l > 0,1$ – линейный (Б.2, Б.6, Б.10);
- в) купольных круговых и близких к ним по очертанию – синусоидальный (Б.11).

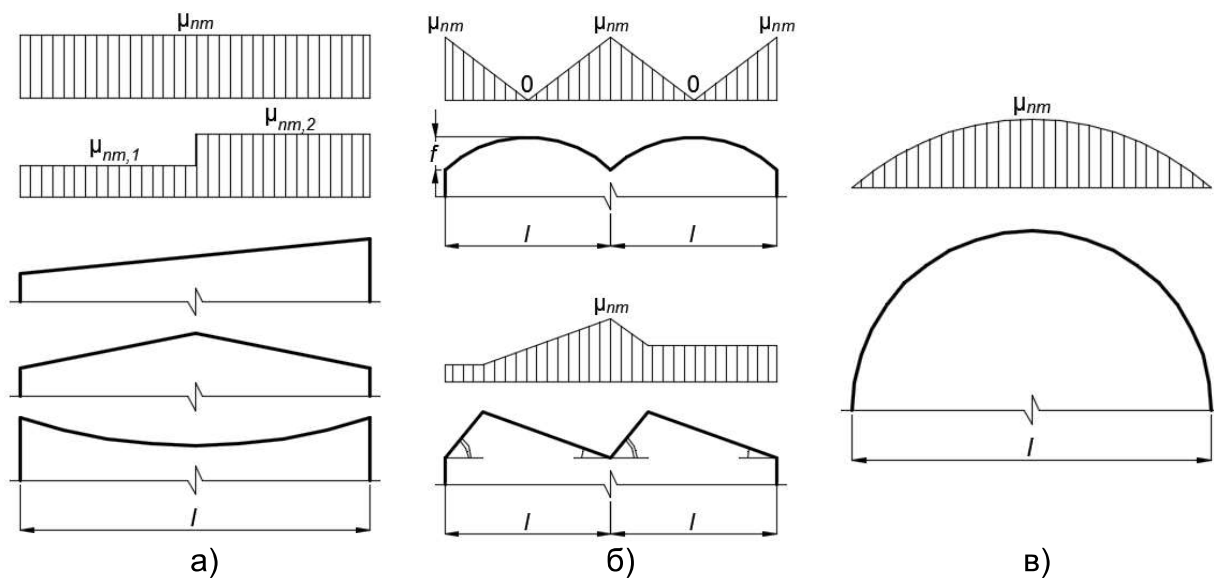


Рисунок 6.3 – Основные закономерности распределения снеговой нагрузки по покрытию

7 Методики оценок аэроупругих эффектов

Аэроупругие явления обусловлены формой поперечного сечения тела, его конфигурацией и ориентацией относительно направления потока, упругими, инерционными и демпфирующими свойствами, структурой ветра и другими факторами. Под демпфирующими свойствами понимают способность конструкций к рассеиванию энергии колебаний за счет сопротивления среды, в которой происходят колебания, сопротивления трения в опорных закреплениях, соединениях, а также сопротивления в результате внутреннего трения в материале сооружения.

Легкие, гибкие, большепролетные сооружения или отдельные элементы конструкций подвержены возникновению аэроупругих явлений. Классификация аэроупругих явлений приведена в Приложении В.

В 7.1 представлены основные сведения об определении аэродинамических коэффициентов и характеристик, необходимых для оценок аэроупругих эффектов. В 7.2 – 7.4 представлены методики оценки возможности возникновения таких явлений как галопирование, дивергенция и вихревое возбуждение, основанные на инженерном (нормативном) подходе. В 7.5 описан подход к оценке аэроупругих эффектов, основанный на прямом связанном моделировании.

7.1 Определение аэродинамических характеристик для оценок аэроупругих явлений

7.1.1 Для оценки возможности возникновения галопирования и дивергенции необходимо построить зависимости от угла атаки/направления ветра средних значений аэродинамических коэффициентов силы лобового сопротивления $C_D(\alpha)$, подъемной силы $C_L(\alpha)$ и аэродинамического момента $C_{Mz}(\alpha)$.

7.1.1.1 Для башенных сооружений (стелы, консольные элементы) необходимо исследовать направления ветра в горизонтальной плоскости с шагом не более 15° .

Для мостовых конструкций достаточно исследовать углы атаки ветра в вертикальной плоскости от -10° до 10° с шагом не более 2° . Угол атаки 0° соответствует направлению вектора скорости потока, перпендикулярному пролету моста и параллельному земле.

Для иных конструкций допустимо исследовать углы атаки ветра от -20° до 20° с шагом не более 4° . Угол атаки 0° соответствует направлению вектора скорости потока, параллельному земле.

Допускается учитывать симметрию исследуемого объекта для сокращения моделируемых направлений ветра.

В диапазоне углов атаки/направлений ветра, где наблюдается быстрое изменение значений коэффициентов, необходимо провести дополнительные расчеты с меньшим шагом.

7.1.2 Для корректного определения значений аэродинамических коэффициентов необходимо провести расчеты в трехмерной постановке для полной модели исследуемого объекта. Результаты расчетов в квази-двухмерной постановке для характерных сечений исследуемого объекта могут использоваться в качестве первичной оценки значений аэродинамических коэффициентов (для конструкций с постоянным сечением), а также как оценка качества сетки (разрешение пограничного слоя).

где $Q = \frac{\rho_a V_m^2}{2}$ – ветровой напор (плотность воздуха ρ_a см. в Приложении Г), Па;

V_m – средняя скорость потока, м/с;

$S_{сеч}$ – характерная площадь поперечного сечения, м²;

$B_{сеч}$ – характерный поперечный размер сечения, м.

Характерная площадь поперечного сечения $S_{сеч}$ и характерный поперечный размер сечения $B_{сеч}$ принимаются одинаковыми при вычислении аэродинамических коэффициентов для всех исследуемых углов атаки/направлений ветра (см. рисунок 7.3).

Интегральные нагрузки F_D , F_L , M_z определяются на основе стационарного (см. 5.2.5) или нестационарного (см. 5.2.6) подходов.

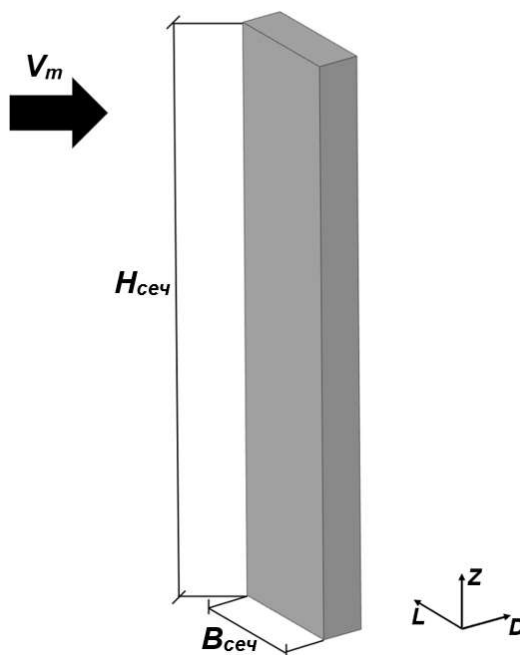


Рисунок 7.3 – Характерная площадь поперечного сечения $S_{сеч}$ ($S_{сеч} = B_{сеч}H_{сеч}$) и характерный поперечный размер сечения B

7.1.3 Для оценки возможности возникновения вихревого возбуждения, а также для определения интенсивности воздействия, действующего при вихревом возбуждении, необходимо определить числа Струхали и амплитуды колебаний аэродинамического коэффициента подъемной силы $C_{L,amp}$.

7.1.3.1 Для мостовых сооружений необходимо рассмотреть два угла атаки ветра, перпендикулярные боковым сторонам пролета. В случае симметрии поперечного сечения достаточно рассмотреть один угол атаки ветра.

Для высотных зданий и сооружений необходимо в первую очередь рассмотреть направления ветра, перпендикулярные плоскости колебаний соответствующих низших собственных изгибных форм колебаний (см. Приложение Б).

7.1.3.2 Направление оси L определяется согласно 7.1.2.1.

7.1.3.3 На основе нестационарного подхода определяется зависимость подъемной силы от времени $F_L(t)$. Для определения частотных характеристик $F_L(t)$ рассматривается в установившемся режиме (см. 5.2.6).

Т.к. зависимости аэродинамических коэффициентов представляют собой дискретную функцию, то производную подъемной силы $dC_L / d\alpha$ нужно вычислять с помощью метода конечных разностей. При вычислении производной угол атаки/направление ветра α необходимо представить в радианах.

7.2.2 Необходимое условие возникновения явления галопирования (критерий Ден-Гартога):

$$a_g(\alpha) \leq 0. \quad (7.9)$$

Для уточнения диапазонов из условия 7.9 следует исследовать дополнительные углы атаки/направления ветра α в зоне смены знака a_g .

7.2.3 Для углов атаки/направлений ветра, при которых выполняется условие (7.9), вычисляется критическая скорость возникновения галопирования:

$$V_g = \frac{2f_{изг,1} B_{сеч} Sc}{a_g}, \quad (7.10)$$

где $f_{изг,1}$ – первая изгибная собственная частота колебаний конструкции, Гц (см. Приложение Б);

Sc – число Скратона:

$$Sc = \frac{2\bar{\delta}_s m_{e,1}}{\rho_a B_{сеч}^2}, \quad (7.11)$$

где $m_{e,1}$ – эквивалентная погонная масса для 1-й изгибной собственной формы, кг/м (см. Приложение Б);

$\bar{\delta}_s$ – коэффициент конструкционного демпфирования (см. Приложение Б, таблица Б.1).

7.2.4 Аэроупругая неустойчивость конструкции типа галопирования возникает в том случае, если выполняется условие:

$$V_g < 1,25V_{max}(z_e), \quad (7.12)$$

где $V_{max}(z_e)$ – максимально возможная скорость ветра для места строительства на уровне z_e :

$$V_{max}(z_e) = \sqrt{\frac{2w_0 k(z_e) \gamma_f}{\rho_a}}, \quad (7.13)$$

где w_0 – нормативное ветровое давление/напор (см. п. 11.1.4 СП 20.13330);

z_e – эквивалентная высота, зависящая от размеров сооружения (см. п. 11.1.5 СП 20.13330);

$k(z_e)$ – коэффициент, учитывающий изменение средней составляющей давления ветра на высоте z_e для соответствующего типа местности (см. п. 11.1.6 СП 20.13330);

γ_f – коэффициент надежности по нагрузке ($\gamma_f = 1,4$).

7.3 Дивергенция

7.3.1 Необходимое условие возникновения дивергенции:

$$\frac{dC_{Mz}}{d\alpha} \leq 0. \quad (7.14)$$

Т.к. зависимость коэффициента аэродинамического момента представляет собой дискретную функцию, то производную $dC_{Mz} / d\alpha$ нужно вычислять с помощью метода конечных разностей. При вычислении производной угол атаки/направление ветра α необходимо представить в радианах.

взаимодействие динамического поведения конструкции и ветрового потока в нестационарной постановке.

7.5.3 Двухсторонний связанный (сопряженный) расчет (2-way FSI) – итерационный процесс, на каждом шаге которого поочередно производятся два расчета – динамический (механический) расчет упругой системы и аэродинамический расчет окружающего воздушного потока, включая процесс обмена данными этих расчетов между собой. Из динамического расчета в аэродинамическую модель передаются перемещения узлов на границе контакта упругого тела и воздуха. На основе новых координат узлов обновляется КО-сетка и решается задача аэродинамики. Из аэродинамического расчета в механическую модель передаются давления, которые выступают в качестве нагружения на контактную поверхность. На рисунке 7.4 схематически приведена процедура решения для двухстороннего связанного расчета.

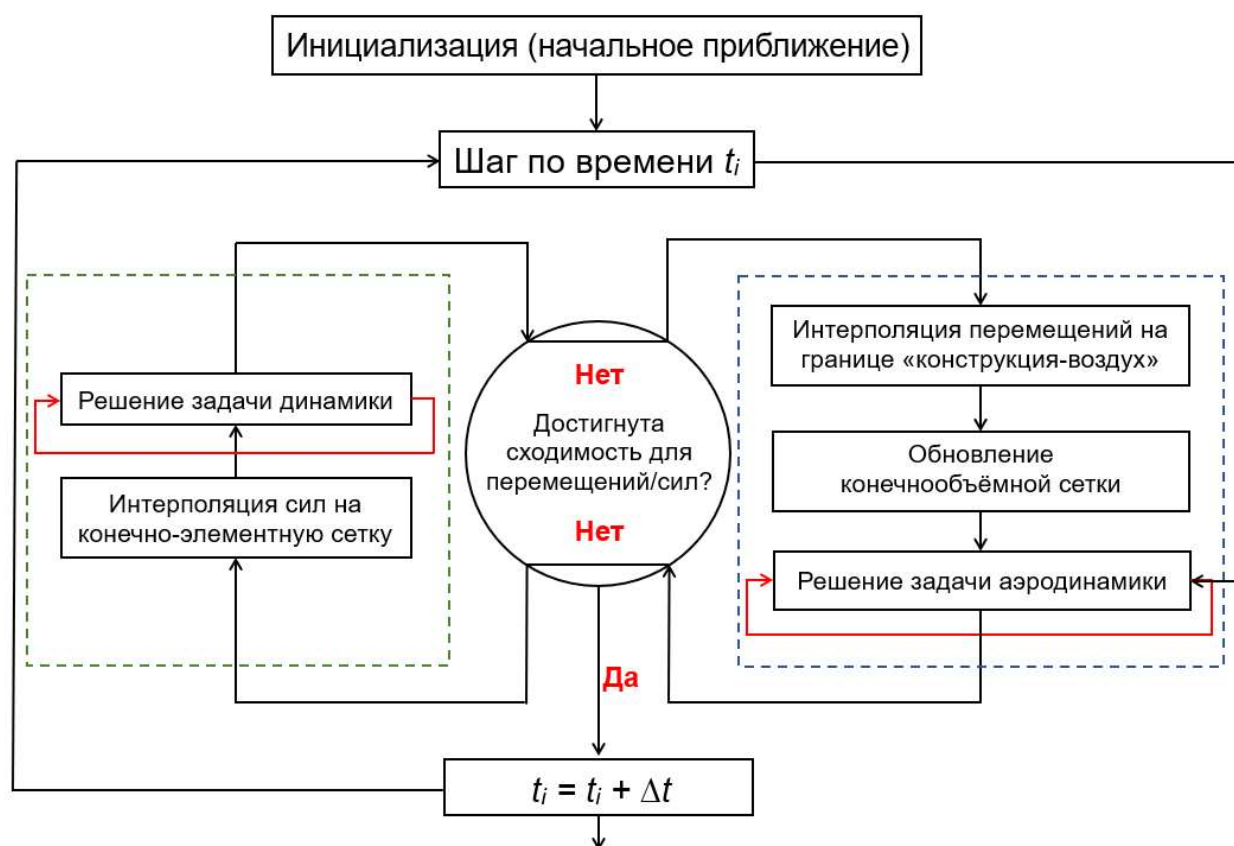


Рисунок 7.4 – Процедура решения для двухстороннего связанного (сопряженного) расчета

7.5.4 Для аэродинамического расчета рекомендуется использовать пространственную дискретизацию уравнений методом конечных объемов (МКО). Для механического (динамического) расчета рекомендуется использовать пространственную дискретизацию уравнений методом конечных элементов (МКЭ), а решение во временной области – методом Ньюмарка. При необходимости в механических моделях следует учитывать физическую и геометрическую нелинейность.

Р 59625-2022. Подробные требования и методики представлены в иностранном стандарте ASCE/SEI 49-21 [29].

Таким образом, принципы и требования к комплексному моделированию подробно не представлены ни в одном российском или зарубежном стандарте и впервые приводятся в настоящем документе.

Раздел содержит возможности, требования и рекомендации по комплексному моделированию аэродинамики.

8.1 Требования и возможности

8.1.1 Схема размещения датчиков измерения давлений и скоростей в физических моделях должна основываться на результатах предварительного численного моделирования, выявляющего характерные и наиболее опасные зоны.

8.1.2 Исследуемые направления ветра и системы координат в физическом и численном моделировании должны совпадать.

8.1.3 Все используемые численные модели должны быть верифицированы (см. Приложение А).

8.1.4 Физические модели должны быть верифицированы (исследована автомодельность для показаний всех датчиков, оценены погрешности экспериментальных данных на основе серии аналогичных испытаний или анализа симметричных случаев).

8.1.5 Численные модели для ветровых нагрузок и оценок аэроупругих эффектов должны быть валидированы [15] на результатах физического моделирования в АДТ (см. Приложение А).

8.1.6 В силу различий в методологии и технической реализации методов физического и численного моделирования валидацию численных моделей для снеговых нагрузок проводить не следует.

8.1.7 После валидации численной модели ветровых нагрузок дальнейшие исследования рекомендуется проводить на расширенной численной модели, отказавшись от ограничений АДТ (малый радиус застройки, отсутствие рельефа и др.).

8.1.8 В зависимости от применяемых методов и постановки задачи результаты физического и численного моделирования снеговых нагрузок могут, но не обязаны совпадать в том случае, если моделируются разные стороны одного сложного явления снегонакопления.

8.1.9 При физическом и численном моделировании снеговых нагрузок должны быть рассмотрены одни и те же направления ветра в одинаковом интервале скоростей.

8.1.10 Для корректного определения частот и амплитуд колебаний аэродинамических сил при физическом моделировании необходимо оценить и отфильтровать части сигнала, вызванные колебаниями аэродинамической трубы и макета.

8.1.11 Методики оценки возможности возникновения аэроупругих эффектов, представленные в 7.2 – 7.4, могут быть реализованы как на основе численного, так и физического моделирования [30].

8.1.12 Численное моделирование может использоваться в качестве инструмента быстрых предварительных проверок аэроупругой устойчивости на ранних этапах проектирования при подборе формы сечения и параметров гасителей колебаний. В таком случае валидация численных моделей не требуется.

Приложение А (рекомендуемое)

Верификация и валидация численных моделей

Настоящий раздел носит рекомендательный характер и направлен на постепенное внедрение процедур верификации и валидации.

Понятия верификации и валидации имеют собственную интерпретацию в разных областях науки и техники. В разделе приводятся процедуры верификации и валидации, а также сопутствующие термины и принципы в одном из вариантов, принятых в международном научном сообществе CFD [31-33].

Предварительные термины и замечания:

Точность – степень соответствия между моделируемым (физически или численно) значением величины S и его истинным значением T .

Погрешность δ – разница между моделируемым (физически или численно) значением величины S и её истинным значением T .

Точность растёт по мере уменьшения погрешности.

Истинные значения искомых аэродинамических характеристик никогда не известны, поэтому точно вычислить погрешности невозможно, но можно провести их оценку (оцененное значение погрешности обозначается δ^*).

Неопределенность U задает интервал $\pm U$ обеспеченности для найденной величины.

Погрешности и неопределенности результатов численного моделирования состоят из двух частей: модельных и численных. Модельные погрешности δ_{SM} и неопределенности U_{SM} обусловлены допущениями и приближениями математической модели физического явления: математическими уравнениями, геометрией, граничными условиями, моделями турбулентности, свойствами среды и т.д. Численные погрешности δ_{SN} и неопределенности U_{SN} обусловлены численным решением математических уравнений: пространственной и временной дискретизациями, искусственной вязкостью численных схем, неполной итерационной и сеточной сходимостями, частичным нарушением законов сохранения массы, импульса, энергии, компьютерным округлением и т.д.

Выражение для погрешности моделирования:

$$\begin{aligned}\delta_S &= S - T = \delta_{SM} + \delta_{SN}; \\ \delta_{SM} &= M - T; \quad \delta_{SN} = S - M,\end{aligned}\tag{A.1}$$

где M – модельное значение величины (точное решение уравнений).

Выражение для неопределенности численного моделирования:

$$U_S^2 = U_{SM}^2 + U_{SN}^2.\tag{A.2}$$

Численная погрешность может быть оценена следующим образом:

$$\delta_{SN} = \delta_{SN}^* + \varepsilon_{SN},\tag{A.3}$$

где δ_{SN}^* – оценка величины и знака δ_{SN} ; ε_{SN} – погрешность этой оценки.

После проведения оценок погрешностей численно моделируемые значения могут быть скорректированы:

$$S_C = S - \delta_{SN}^*;\tag{A.4}$$

точностью. В результате верификации численная модель может быть скорректирована, что является одной из целей верификации.

А.1.2 При верификации оцениваются погрешности и неопределенности искомых в конкретной задаче величин (интегральных ветровых нагрузок, статических давлений в характерных точках, скоростей ветра в пешеходных зонах и т.д.).

А.1.3 Допустимо проводить верификацию только для нескольких направлений / скоростей ветра.

А.1.4 Наибольшее влияние на численную погрешность δ_{SN} и неопределенность U_{SN} оказывают использование итерационных методов, пространственная и временная дискретизация, искусственная вязкость численных схем:

$$\delta_{SN} = \delta_I + \delta_G + \delta_T + \delta_P ; \quad (A.7)$$

$$U_{SN}^2 = U_I^2 + U_G^2 + U_T^2 + U_P^2 , \quad (A.8)$$

где δ_I , U_I – погрешности и неопределенности, обусловленные неполной итерационной сходимостью;

δ_G , U_G – погрешности и неопределенности, обусловленные пространственной дискретизацией;

δ_T , U_T – погрешности и неопределенности, обусловленные временной дискретизацией;

δ_P , U_P – погрешности и неопределенности, обусловленные остальными факторами.

А.1.5 В задачах, решаемых в стационарной постановке, прежде всего необходимо обеспечить высокую итерационную сходимость искомых величин. Плохая итерационная сходимость говорит о необходимости доработки модели, а дальнейшую верификацию следует прекратить, т.к. корректно оценить погрешности и неопределенности от других причин окажется невозможным.

А.1.6 В задачах, решаемых в нестационарной постановке, прежде всего должна быть обеспечена высокая и «быстрая» итерационная сходимость невязок решения на каждом временном шаге (сходимость по критериями, рекомендуемым в документации программного комплекса, не более, чем за 10 итераций).

А.1.7 Помимо достижения итерационной сходимости следует убедиться, что размеры расчетной области достаточно велики (см. раздел 4) и не вызывают значимых погрешностей. Малые размеры расчетной области могут недопустимо повысить δ_P .

А.1.8 Для оценки сеточной сходимости (δ_G^* , U_G) следует провести несколько расчетов с постепенным измельчением сетки. Коэффициент уточнения сетки ($r_k = \Delta x_k / \Delta x_{k+1}$, где k – номер сетки, Δx – размер КО) должен быть единым во всей расчетной области). Минимально допустимое значение $r_k = \sqrt{2}$.

Подробно методика определения δ_G^* , U_G представлена, например, в [31-33].

А.1.9 Для оценки сходимости по временной дискретизации (δ_T , U_T) в нестационарной постановке следует провести несколько расчетов с постепенным уменьшением временного шага. Минимально допустимое значение коэффициента сокращения временного шага равно 2.

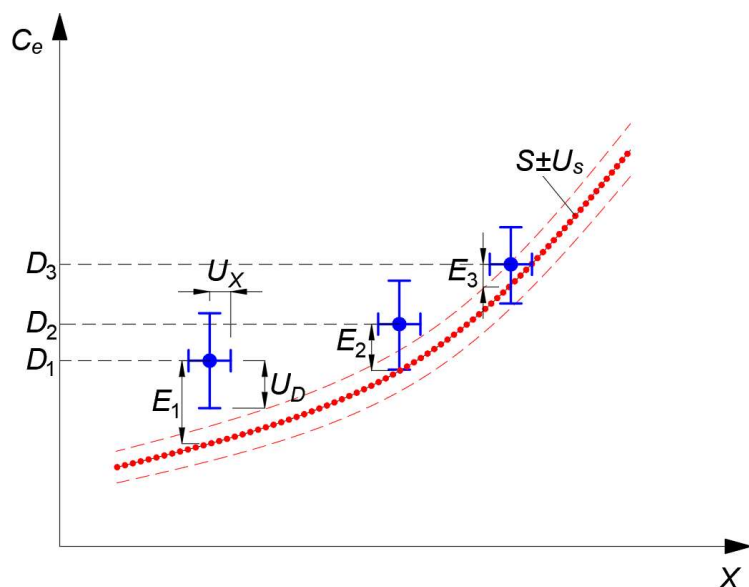


Рисунок А.2 – Результаты численного (красный) и физического (синий) моделирования аэродинамических коэффициентов C_e с оценкой неопределенностей, X – некоторая координата

А.2.7 Валидация может выступать обоснованным способом подбора модели турбулентности для решения соответствующего типа задач (см. рисунок А.3 [15]).

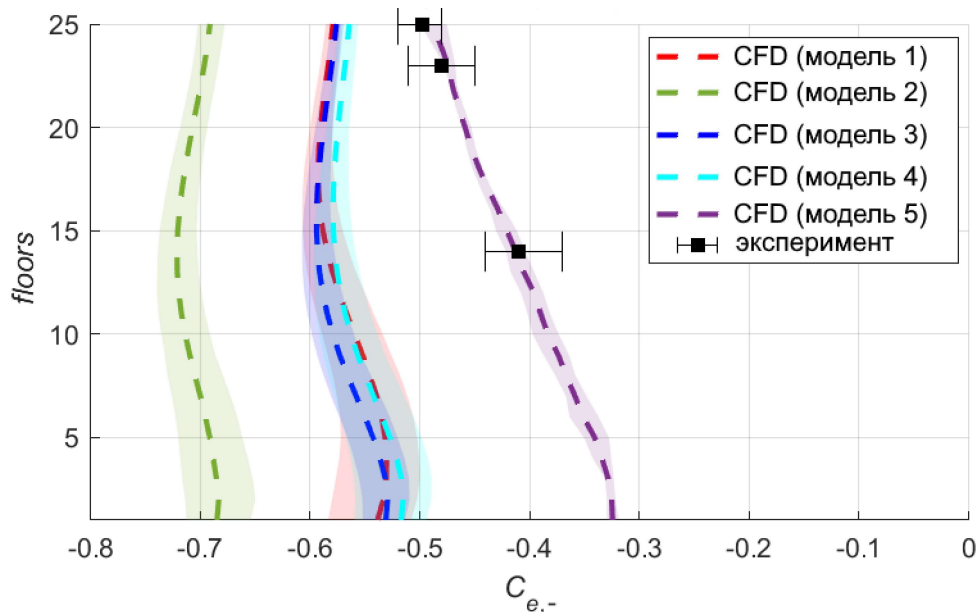


Рисунок А.3 – Пример сопоставления пиковых отрицательных аэродинамических коэффициентов $C_{e,-}$ вдоль вертикального сечения фасада 25-ти этажного здания

А.2.8 После достижения необходимой степени валидации численной модели в дальнейших исследованиях возможно использовать верифицированную расширенную численную модель, не ограниченную условиями АДТ.

Такой подход позволяет использовать преимущества математического моделирования при обоснованной достоверности получаемых результатов.

А.2.9 При наличии у организации опубликованной успешной валидации для аналогичной задачи и объекта при использовании тех же математических моделей,

Приложение Б (рекомендуемое)

Рекомендации к расчетам конструкций для задач аэроупругости

В настоящему приложении приведены рекомендации, касающиеся механических характеристик и поведения конструкций, необходимые для аэроупругих оценок и расчетов при вихревом возбуждении.

Б.1 Общие положения

Б.1.1 Для определения критической скорости возникновения галопирования необходимо вычислить первую изгибную собственную частоту колебаний конструкции и соответствующую ей эквивалентную погонную массу.

Б.1.2 Для определения критической скорости возникновения галопирования необходимо вычислить параметр крутильной жесткости GJ_t (G – модуль сдвига материала, J_t – крутящий момент инерции поперечного сечения).

Б.1.3 Для определения критических скоростей возникновения вихревого возбуждения необходимо вычислить изгибные собственные частоты конструкции.

Б.1.4 Быстрый и вычислительно незатратный метод расчета сооружений и отдельных конструкций при вихревом возбуждении – гармонический анализ на резонансных собственных частотах сооружения.

Б.2 Модальный анализ

Б.2.1 Собственные формы и частоты колебаний сооружений и отдельных конструкций следует определять в верифицированных программных комплексах, реализующих модальный анализ на основе метода конечных элементов.

Б.2.2 Собственные частоты и формы колебания зданий и сооружений следует определять с учетом всех масс, без учета коэффициентов надежности по нагрузкам и ответственности. Также следует учитывать значимые преднапряжения в конструкциях, например от вант.

Б.2.3 Собственные формы и частоты колебаний следует определять с нормативными жесткостными свойствами материалов и динамическими свойствами грунтов основания.

Б.2.4 Уравнение для собственных колебаний (частичная проблема собственных значений) для КЭ-модели имеет вид:

$$[K][\Phi] = [\Omega^2][M][\Phi]; \quad (Б.1)$$
$$[\Phi] = [\{\phi\}_1, \{\phi\}_2, \dots, \{\phi\}_n]; \quad [\Omega^2] = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2),$$

где $\{\phi\}_i$ – вектор, характеризующий форму собственных колебаний (соотношения между смещениями/углами поворота узлов);

ω_i – круговая частота собственных колебаний, рад/с;

$[M]$ – матрица инерции (масс);

$[K]$ – матрица жесткости.

Б.2.5 Формы собственных колебаний $\{\phi\}_i$, соответствующие круговым частотам собственных колебаний ω_i , вычисляются с точностью до произвольного множителя, значение которого определяется избранным способом нормировки собственных форм: как правило, формы нормируются так, чтобы максимальная компонента вектора $\{\phi\}_i$ равнялась единице. В качестве метода решения

Таблица Б.1 – Значения коэффициента конструкционного демпфирования δ_s

Тип конструкции		Значение коэффициента конструкционного демпфирования δ_s
Здания с железобетонным каркасом		0,10
Здания со стальным каркасом		0,05
Здания со смешанным каркасом (сталь и бетон)		0,08
Мачты и дымовые трубы из железобетона		0,03
Сварные стальные дымовые трубы без наружной теплоизоляции		0,012
Сварные стальные дымовые трубы с наружной теплоизоляцией		0,020
Стальные дымовые трубы с обсадной трубой и с наружной теплоизоляцией ^{а)}	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b \leq 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,014
Стальные дымовые трубы с двумя и более обсадными трубами и с наружной теплоизоляцией ^{а)}	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b \leq 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,025
Стальные дымовые трубы с внутренней кирпичной облицовкой		0,070
Стальные дымовые трубы с внутренней облицовкой из торкретбетона		0,030
Связанные стальные дымовые трубы без обсадной трубы		0,015
Расчлененные стальные дымовые трубы без обсадной трубы		0,04
Стальные мосты и мачты решетчатой конструкции	сварные	0,02
	высокопрочные болты	0,03
	обыкновенные болты	0,05
Сталежелезобетонные мосты		0,04
Железобетонные мосты	предварительно напряженные без трещин	0,04
	с трещинами	0,10
Деревянные мосты		0,06 – 0,12
Мосты из алюминиевых сплавов		0,02
Мосты, усиленные стекло- или пластиковым волокном		0,04 – 0,08
Канаты	Параллельные связки проволоки	0,006
	Проволока, расположенная в виде спирали	0,020
Примечание 1 – Значения для деревянных и пластмассовых составных конструкций являются только указаниями; если аэродинамические воздействия важны для расчета, то более точные формы колебаний определяют с применением специальных исследований. Примечание 2 – Для вантовых мостов значения из таблицы Б.1 умножают на коэффициент 0,75.		
^{а)} Для промежуточных значений h/b допускается линейная интерполяция.		

Б.4 Определение эффективной погонной массы

Б.4.1 Вычисление эквивалентной погонной массы $m_{e,i}$ для i -й изгибной собственной формы основано на подходе определения эффективных масс $M_{eff,i}$

Приложение В (справочное)

Классификация аэроупругих явлений

В.1 Явления аэроупругости возникают в результате взаимного влияния ветрового потока и перемещений конструкции или элемента конструкции. Аэроупругая неустойчивость – процесс, при котором отклонения конструкции в ветровом потоке носят нарастающий во времени характер под действием аэродинамических сил.

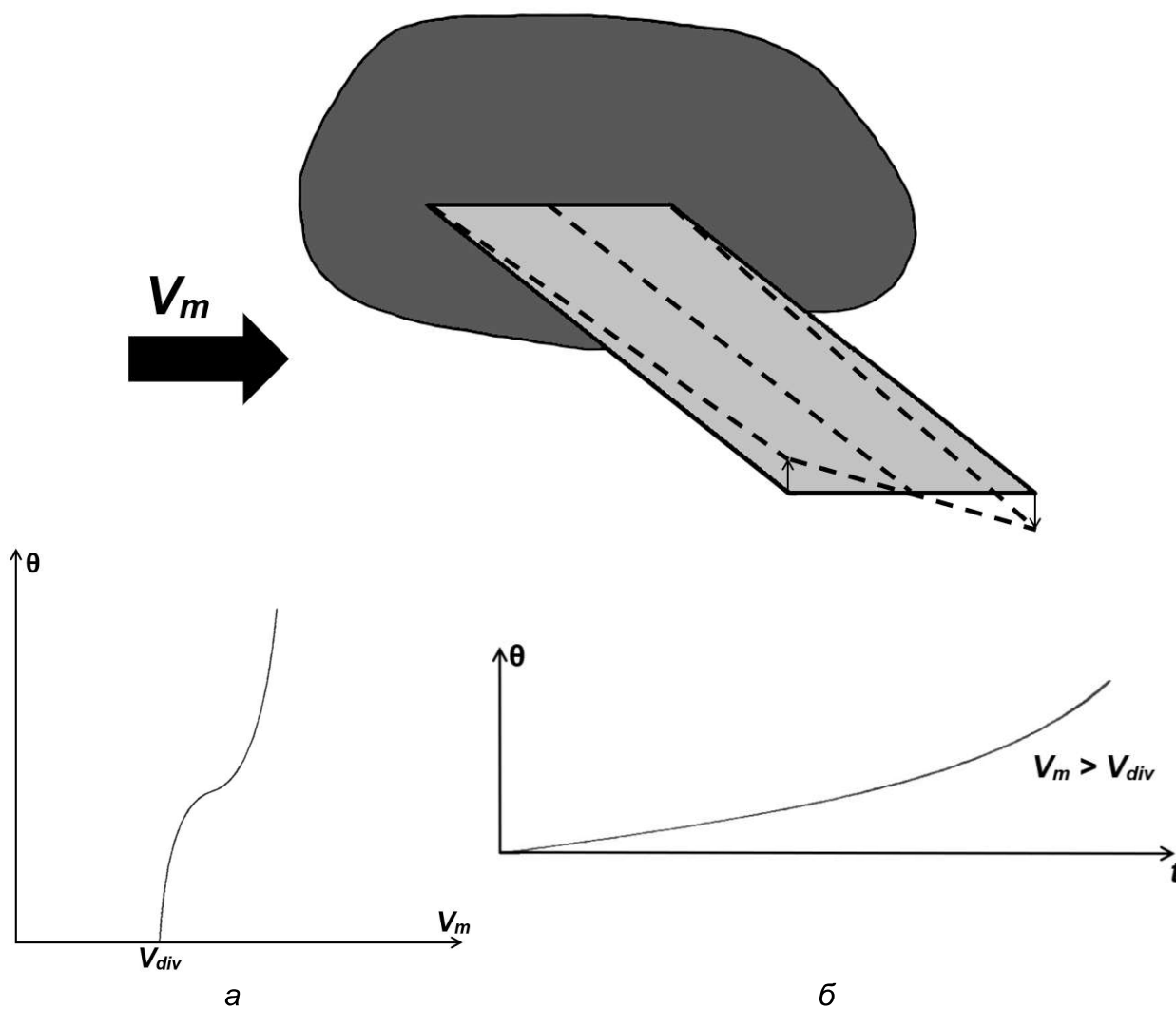
Для описания аэроупругих эффектов применяются различные модели, основанные на использовании экспериментальных/натурных данных. Основные виды аэроупругой неустойчивости, модели описывающие аэроупругие явления, результаты теоретических, численных и экспериментальных исследований этих моделей достаточно подробно описаны в монографиях [35-38].

В.2 Аэроупругие явления обусловлены формой поперечного сечения тела, его конфигурацией и ориентацией относительно направления потока, упругими, инерционными и демпфирующими свойствами, структурой ветра и другими факторами. Под демпфирующими свойствами понимают способность конструкций к рассеиванию энергии колебаний за счет сопротивления среды, в которой происходят колебания, сопротивления трения в опорных креплениях, соединениях, а также сопротивления в результате внутреннего трения в материале сооружения. Мерой сопротивления является логарифмический декремент колебаний, определяемый как натуральный логарифм отношения двух последовательных амплитуд колебаний. Большинство этих явлений связано, как правило, с определенным типом колебаний, представляют исключительный интерес с точки зрения механизма возникновения и обуславливают надежность и долговечность конструкций.

В.3 К причинам аэроупругих колебаний конструкций в ветровом потоке можно отнести следующее:

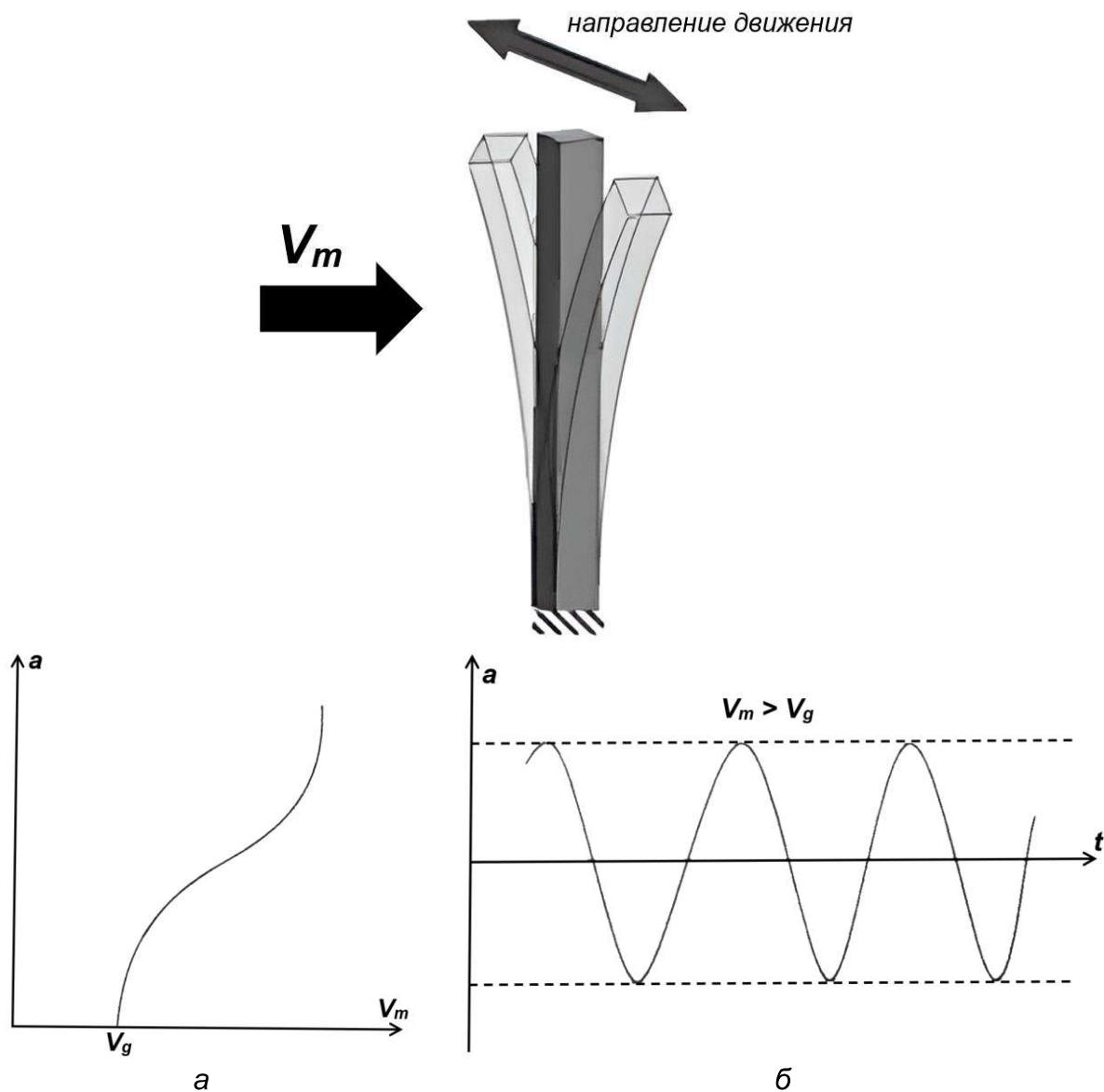
- порывы ветра;
- периодические аэродинамические силы, обусловленные срывом вихрей;
- отрицательное аэродинамическое демпфирование, приводящее к автоколебаниям;
- аэродинамическая связь между изгибной и крутильной формами деформаций; периодические изменения параметров системы.

В.4 В [35] предлагается классификация аэроупругих явлений, которая охватывает практически все известные формы поведения упругих тел в ветровом потоке (см. рисунок В.1). Условно можно различать явления статической и динамической аэроупругой неустойчивости.



Характер изменения угла крутильных колебаний θ от:
 а – скорости ветра V_m ; б – времени t
 (V_{div} – критическая скорость возникновения дивергенции)
 Рисунок В.2 – Пояснение характера проявления дивергенции

В.7 *Вихревое возбуждение* – интенсивные колебания конструкции поперек потока в узком диапазоне скоростей ветра, возникающие при совпадении одной из собственных частот колебаний конструкции с частотой срыва вихрей Кармана. (см. рисунок В.3). Амплитуда колебаний при вихревом возбуждении зависит от формы поперечного сечения элементов, жесткостных и диссипативных свойств элементов конструкции в плоскости колебаний.



Характер изменения амплитуды колебаний a от:
 a – скорости ветра V_m ; b – времени t
 (V_g – критическая скорость возникновения галопирования)
 Рисунок В.4 – Пояснение характера проявления галопирования

В.9 *Изгибно-крутильный (классический) флаттер* – связанные изгибно-крутильные, нарастающие во времени, самовозбуждающиеся колебания, вызванные несовпадением аэродинамического центра (точки приложения аэродинамических сил) с центром изгиба поперечного сечения конструкции. Нарастающие в течение нескольких секунд амплитуды колебаний при изгибно-крутильном флаттере достигают настолько больших значений, что могут разрушить конструкцию (см. рисунок В.5).

точки крепления канатов на пилоне. При этом между свободными вертикальными и горизонтальными колебаниями устанавливается параметрическая связь, которая управляет перекачкой энергии из одного вида колебаний в другой.

В.12 *Бафтинг* – аэроупругие автоколебания конструкции, представляющие собой вынужденные колебания, вызванные периодическим срывом турбулентных вихрей с расположенных впереди объектов при их обтекании.

В.13 Такие явления, как изгибно-крутильный флаттер, галопирование, дивергенция, считаются недопустимыми, поскольку увеличение скорости потока и времени его действия приводит к неограниченному нарастанию деформации или амплитуд колебаний. Для параметрического резонанса, вихревого возбуждения и срывного флаттера, амплитуда которых в установившемся режиме ограничена максимальным значением в окрестности критических скоростей потока, нужно определить возможные установившиеся режимы колебаний, соответствующие критические скорости и амплитудно-частотные соотношения, а также напряженно-деформированное состояние.

В.14 В отечественных (СП 20.13330, СП 296.1325800, ГОСТ Р 59625) и зарубежных (Eurocode EN 1991-1-4 [28], CNR-DT 207/2018 [26]) нормативных документах содержатся количественные критерии возникновения таких видов аэроупругой неустойчивости, как вихревое возбуждение, галопирование и дивергенция. Данные рекомендации составляют основу методикам, приведенным в 7.2 – 0. Для иных эффектов аэроупругости в нормативных документах не приводятся инженерных оценок.

В итоге уравнения гидрогазодинамики преобразуются к виду, позволяющему определить усредненные по времени характеристики потока [10]:

- уравнение Рейнольдса:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j}; \quad (\text{Г.4})$$

- уравнения непрерывности:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0, \quad (\text{Г.5})$$

где $\overline{u'_i u'_j}$ – тензор рейнольдсовых напряжений.

Система Г.4-Г.5 не замкнута из-за наличия неизвестных тензора рейнольдсовых напряжений и требуют дополнительных уравнений – моделей турбулентности (см. 4.1.3.1).

При последовательном измельчении сетки решение уравнений RANS не стремится к точному решению Г.1-Г.2, т.к. модели турбулентности основаны на физических, а не сеточных характеристиках.

Решение уравнений RANS детерминистическое и не разрешает непрерывного спектра турбулентности.

Г.4 Система уравнений для подхода LES базируется на фильтрации (усреднении) точного решения по некоторой области пространства. В МКО используется фильтрование по области конечного объема:

$$\begin{aligned} \bar{u}_j(\mathbf{x}, t) &= \frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} u_j(\mathbf{x} - \mathbf{r}, t) d\mathbf{r}; \\ \bar{p}(\mathbf{x}, t) &= \frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} p(\mathbf{x} - \mathbf{r}, t) d\mathbf{r}, \end{aligned} \quad (\text{Г.6})$$

где u_j – компоненты вектора скорости по осям x_j ;

p – давление;

\mathbf{r} – радиус-вектор;

t – время;

ΔV – объем сеточной ячейки.

Точное решение может быть представлено в виде суммы отфильтрованной и остаточной компонент:

$$\begin{aligned} u_j(\mathbf{x}, t) &= \bar{u}_j(\mathbf{x}, t) + u'_j(\mathbf{x}, t); \\ p(\mathbf{x}, t) &= \bar{p}(\mathbf{x}, t) + p'(\mathbf{x}, t). \end{aligned} \quad (\text{Г.7})$$

В итоге уравнения гидрогазодинамики преобразуются к виду [40]:

- уравнение движения:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^r}{\partial x_j}; \quad (\text{Г.8})$$

- уравнения непрерывности:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0; \quad \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_j} = 0, \quad (\text{Г.9})$$

где $\tau_{ij}^r = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$ – тензор остаточных напряжений.

Библиография

- [1] Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 96, p. 1749–1761, 2008.
- [2] Menter F.R, Lechner R., Matyushenko A. Best practice: generalized k- ω two-equation turbulence model in ANSYS CFD (GEKO), 2019.
- [3] Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems // *Atmospheric environment*. – 2007. – V. 41. – №. 2. – P. 238-252.
- [4] Волков К. Н. Пристеночное моделирование в расчетах турбулентных течений на неструктурированных сетках // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2007. – Т. 14. – №. 1. – С. 113-129.
- [5] Abu-Zidan Y., Mendis P., Gunawardena T. Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings // *Heliyon*. – Т. 7. – №. 4.
- [6] Белостоцкий А.М, Афанасьева И.Н., Ланцова И.Ю. Оценка пешеходной комфортности на основе численного моделирования ветровой аэродинамики зданий в окружающей застройке // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2019. – Т. 15. – №. 2. – С. 24-39.
- [7] Franke J., Hellsten A., Schlünzen H., Carissimo B. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment / Brussels, Belgium: COST Office, 2007. – 51 p.
- [8] Menter F. R., Lechner R., Matyushenko A. Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD // ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA. – 2021.
- [9] Menter F.R. Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD. Version 2.00 / Technical Report: ANSYS Germany GmbH, 2015. – 75 p.
- [10] Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства // М.: Издательство АСВ. – 2017. – 720 с.
- [11] Методическое пособие «Математическое (численное) моделирование ветровых нагрузок и воздействий» (к СП 20.13330.2016), М., ФАУ ФЦС Минстроя России, 2020.
- [12] Барштейн М. Ф. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра // М.: Стройиздат. – 1978. – Т. 120.
- [13] Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. М., ЦНИИСК им. Кучеренко. 1978.
- [14] Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки. – Госстрой России, сост. Попов Н.А. // М.: ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2000. – 45 с.
- [15] Горячевский О.С. Численное моделирование ветровых давлений на окна. Валидация для типового многоэтажного здания квадратной формы // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2023. – Т. 19. – №. 3. – С. 114-129.
- [16] Перельмутер А. В. и др. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения // М.: Изд-во СКАД СОФТ, изд-во АСВ, изд-во ДМК Пресс. – 2014. – 596 с. – 2007.
- [17] Bagnold R. A. The physics of blown sand and desert dunes. – Courier Corporation. – 2012.

- International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2018. – Т. 14. – №. 1. – С. 102-112.
- [37] Belostotsky A.M., Afanasyeva I.N., Negrozova I.Yu., Goryachevsky O.S. Моделирование аэродинамической неустойчивости строительных конструкций на примере сечения моста. Часть 2: Решение задачи в связанной аэроупругой постановке и сопоставление с инженерными оценками // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – V. 17. – №. 3. – P. 24-38.
- [38] Негрозова И. Ю., Афанасьева И. Н. Обзор аналитических и полуэмпирических подходов для анализа аэродинамической неустойчивости типа флаттер // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2023. – №. 1 (54). – С. 119-140.
- [39] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 6-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 728 с.
- [40] Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 364 с.