

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЕТРОВЫХ И СНЕГОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

СТО 02066523-089-1-2024

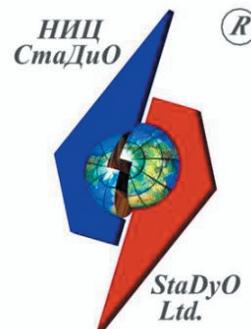
ИЗДАНИЕ ОФИЦИАЛЬНОЕ

**Москва
2024**



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
Ректор НИУ МГСУ

Акимов П.А. /

« 22 » июля 2024 г.



УТВЕРЖДАЮ:
Ген. директор АО НИЦ СтаДиО

Белостоцкий А.М. /

« 22 » июля 2024 г.



СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ И СНЕГОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

NUMERICAL MODELLING OF WIND AND SNOW ACTIONS

СТО 02066523-089-1-2024

Москва – 2024 г.

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 года № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения стандартов организации – ГОСТ Р 1.4-2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения».

Сведения о стандарте:

1 РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) и Акционерным Обществом «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (НИЦ СтаДиО)

2 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ приказом ректора НИУ МГСУ от 22.04.2024 г. № 391/130

3 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ.

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	4
4	Рекомендации по разработке и требования к численным моделям.....	6
4.1	Требования к исследователям	6
4.2	Моделирование турбулентных потоков.....	6
4.3	Детализация и форма расчетной области	8
4.4	Размеры расчетной области, граничные и начальные условия	10
4.5	Пространственная и временная дискретизация численных моделей	11
4.6	Требования к численным схемам	14
4.7	Требования к программным комплексам	15
5	Методики моделирования ветровых нагрузок	15
5.1	Контроль параметров набегающего потока	16
5.2	Интегральные ветровые нагрузки и выбор опасных направлений ветра ...	17
5.3	Позонные средние ветровые нагрузки	21
5.4	Пульсационная составляющая ветровой нагрузки.....	24
5.5	Пиковые ветровые нагрузки	24
5.6	Аэродинамические коэффициенты давлений	27
6	Методика моделирования снеговых нагрузок	27
6.1	Особенности снегонакопления на покрытиях зданий и сооружений	28
6.2	Численное моделирование снегонакопления и снегопереноса	29
6.3	Анализ и интерпретация результатов моделирования.....	31
7	Методики оценок аэроупругих эффектов	34
7.1	Определение аэродинамических характеристик для оценок аэроупругих явлений	34
7.2	Оценка возможности возникновения галопирования.....	37
7.3	Дивергенция	38
7.4	Вихревое возбуждение.....	39
7.5	Прямое связанное моделирование аэроупругости.....	40
8	Принципы гибридного моделирования	41
8.1	Требования и возможности	42
8.2	Разработка рекомендаций по результатам гибридного моделирования	43
	Приложение А (рекомендуемое) Верификация и валидация численных моделей	44

Приложение Б (рекомендуемое) Рекомендации к расчетам конструкций для задач аэроупругости	49
Приложение В (справочное) Классификация аэроупругих явлений	53
Приложение Г (справочное) Уравнения гидрогазодинамики	60
Библиография	63

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.

Гибридный подход на основе физического и численного моделирования способен во многом нивелировать недостатки каждого из подходов и в ряде случаев дать синергический эффект.

Все три вышеперечисленных подхода к моделированию ветровых и снеговых воздействий применяются на территории России, однако нормативные требования существуют только для физического моделирования в аэродинамических трубах. Введение настоящего стандарта обусловлено назревшей необходимостью регламентировать требования к численному и гибриднему 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 гибридному (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 131.13330.2020 Строительная климатология

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.

3.1.3 физическая модель: Физическое представление системы, объекта или процесса с целью их исследования с помощью другого физического, реального объекта, имеющего в том или ином аспекте схожую динамику поведения.

3.1.4 гибридное моделирование: Взаимосвязанные работы по определению искомых величин (ветровые и снеговые нагрузки, скорости ветра, спектры пульсаций давлений и скоростей и др.) на основе результатов численного и физического моделирования.

Примечание – В некоторых источниках можно встретить термины синонимы: комплексное или композитное моделирование.

3.1.5 расчетная область: Замкнутый объем воздуха вокруг исследуемого объекта, включая его границы.

3.1.6 пустая расчетная область: Расчетная область, которая не содержит исследуемый объект и окружающую застройку.

Примечание – Пустая расчетная область должна иметь такие же габариты и сеточную дискретизацию (типы и размеры конечных объемов), как и расчетная область исследуемого объекта. При наличии, границы сопряжения сеток должны быть учтены в пустом домене.

3.1.7 конечно-объемная сетка: Объемная сетка, аппроксимирующая расчетную область воздуха вокруг исследуемого объекта на основе метода конечных объемов.

3.1.8 метод конечных объемов: Численный метод решения уравнений в частных производных, основанный на использовании интегральной формулировки законов сохранения.

3.1.9 модель турбулентности: Математическая модель определения рейнольдсовых напряжений в усредненных уравнениях Навье-Стокса (используется в подходах RANS).

3.1.10 подсеточная модель турбулентности: Математическая модель определения подсеточных напряжений в отфильтрованных уравнениях Навье-Стокса (используется в подходах LES).

3.1.11 пограничный слой: Тонкий слой газа возле поверхности обтекаемого тела, в котором проявляются эффекты вязкости.

3.1.12 физическое время счета: Время, принятое в математической модели исследуемого процесса.

3.1.13 начальные условия: Условия, которым должно удовлетворять решение системы уравнений сплошной среды в начальный момент физического времени ($t = 0$) во всех точках пространства, занятого сплошной средой.

3.1.14 граничные условия: Условия, которые должны выполняться на границах расчетной модели сплошной среды при её движении в любой момент времени.

3.1.15 специализированный промышленный программный комплекс: лицензионный комплекс программ, специализирующийся на численном решении промышленных задач гидрогазодинамики.

Примечание – Научно-образовательные, любительские и т.п. программные комплексы, часто свободно распространяемые, не являются промышленными программными комплексами. Программные комплексы с иным основным назначением, в которые встроены дополнительные модули численного решения задач гидрогазодинамики, не являются специализированными программными комплексами.

3.1.16 зона сбора аэродинамической нагрузки: Поверхность интегрирования ветрового давления или кинетической энергии турбулентности для определения суммарных ветровых нагрузок.

3.1.17 стационарный расчёт: Аэродинамический расчёт в стационарной

постановке (решение уравнений аэродинамики в предположении, что характеристики потока ветра не меняются со временем).

3.1.18 нестационарный расчет: Аэродинамический расчет в нестационарной постановке (решение уравнений аэродинамики с учетом изменения характеристик потока ветра во времени).

3.1.19 пиковое ветровое давление: Максимальные и минимальные во времени значения ветровых давлений.

Примечание – Используются для расчета ограждающих (фасадных) конструкций.

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

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

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

3.1.23 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.

3.1.24 аэроупругость: Область прикладной механики, в которой изучается взаимодействие упругой системы с потоком газа (воздуха).

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

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

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

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

3.1.29 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.

3.1.30 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.

3.1.31 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 взвешенного снега в воздухе вблизи поверхности снеготложения, кг/м³;

C_D – среднее значение аэродинамического коэффициента силы лобового сопротивления;

C_L – среднее значение аэродинамического коэффициента подъемной силы;

C_{Mz} – среднее значение коэффициента аэродинамического момента;

$C_{L,amp}$ – амплитуда колебаний аэродинамического коэффициента подъемной силы;

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

$\bar{F}(t_i)$ – среднее интегральной нагрузки на i -ом шаге времени, кН;

$\hat{F}(t_i)$ – среднее квадратичное отклонение интегральной нагрузки на i -ом шаге времени, кН;

F_X, F_Y – интегральные расчетные ветровые нагрузки, кН;

F_Z – интегральная вертикальная сила, кН;

F_R – векторная сумма нагрузки, кН;

F_D – сила лобового сопротивления, кН;

F_L – подъемная сила, кН;

GJ_t – крутильная жесткость (G – модуль сдвига материала, Па; J_t – крутящий момент инерции поперечного сечения, м⁴);

H_b – характерная высота здания или сооружения, м;

H_s – высота снегового покрова, м;

H_{ground} – толщина снегового покрова на таком участке земли, где влияние окружающей застройки на снеговетровую поток мало, м;

H_{roof} – толщина снегового покрова на покрытии, м;

I_P – интенсивность пульсаций давления;

$K_{F,cor}(z)$ – коэффициент коррекции ветровых нагрузок;

K_s – масштабный коэффициент;

L – периметр перекрытия, м;

M_X, M_Y, M_R – интегральные расчетные опрокидывающие моменты, кН·м;

M_Z – интегральный расчетный крутящий момент, кН·м;

P_{ref} – избыточное статическое давление, Па;

ΔP – относительное статическое давление, соответствующее натурным условиям нестесненного потока, Па;

ΔP_{zone} – средняя составляющая ветрового давления для зоны S_{zone} , Па;

$\Delta P_{+(-)}$ – положительное (отрицательное) пиковое ветровое давление, Па;

$\Delta P_{env,+(-)}$ – огибающая положительных (отрицательных) пиковых ветровых давлений, Па;

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

$\Delta \bar{P}(M, t_i)$ – среднее статического давления на i -ом шаге времени, Па;

$\hat{P}(M, t_i)$ – среднее квадратичное отклонение статического давления на i -ом шаге времени, Па;

$Q(H_b)$ – ветровой напор на характерной высоте объекта, Па;
 Re – число Рейнольдса;
 S – площадь покрытия, м²;
 S_g – нормативное значение веса снегового покрова для участка строительства, определяемое по рекомендациям нормативных документов, кг/м²;
 S_{zone} – площадь зоны сбора аэродинамических нагрузок, м²;
 $S_{сеч}$ – характерная площадь поперечного сечения, м²;
 Sc – число Скратона;
 Sh – число Струхаля;
 $T_{+(-)}$ – 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 – скорость ветра на характерной высоте H_b объекта, 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_z – 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;
 m_p – средняя масса частицы снега, кг;
 q_g – поток обмена массой между воздухом и снежным покровом, кг/м²с;
 q_+ – поток отложения снега, кг/м²с;
 q_- – поток уноса снега, кг/м²с;
 u_* – динамическая скорость (скорость трения), м/с;
 u_t – пороговая динамическая скорость, 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;
 ζ_p – число частиц снега, уносимое единичной аэродинамической силой в единицу времени, $H^{-1} \cdot c^{-1}$;
 $\theta_{+(-)}$ – коэффициенты обеспеченности;
 μ – расчётный коэффициент формы;
 μ_{nm} – численно моделируемый коэффициент формы;
 ν_a – кинематическая вязкость воздуха, m^2/c ;
 ρ_a – плотность воздуха, kg/m^3 ;
 ρ_s – насыпная плотность снега, kg/m^3 ;
 σ_p – стандарт пульсаций давления, Па;
 τ_w – местное напряжение сдвига на поверхности, Па;
 ψ_{OQ} – метрика качества ортогональности конечного объема;

АДТ – аэродинамическая труба;

КО – конечный объем;

CFD – Computational Fluid Dynamics, вычислительная гидрогазодинамика;

CFL – Courant–Friedrichs–Lewy condition, критерий Куранта–Фридрихса–

Леви;

DES – Detached Eddy Simulation, моделирование отсоединенных вихрей;

DNS – Direct Numerical Simulation, прямое численное моделирование;

FSI – Fluid Structure Interaction, задача взаимодействия жидкости/газа и конструкции;

RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes, усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса;

SST $k-\omega$ – Menter's Shear Stress Transport turbulence model, модель турбулентности Ментера;

GEKO $k-\omega$ – Generalized $k-\omega$ model, обобщенная $k-\omega$ модель;

LES – Large Eddy Simulation, метод крупных вихрей.

4 Рекомендации по разработке и требования к численным моделям

4.1 Требования к исследователям

4.1.1 Численным моделированием ветровых и снеговых нагрузок в рамках научно-технического сопровождения могут легитимно заниматься организации, имеющие действующий научный коллектив специалистов по строительной аэродинамике.

4.1.2 Научный коллектив должен обладать подтвержденным опытом численного моделирования задач строительной аэродинамики в рамках научно-технического сопровождения или научно-исследовательских работ.

4.1.3 Научный коллектив должен обладать опытом верификационных и валидационных исследований задач строительной аэродинамики, подтвержденных публикациями в ведущих рецензируемых научных журналах.

4.2 Моделирование турбулентных потоков

4.2.1 Течения ветровых потоков в задачах строительной аэродинамики выражено турбулентны (высокие числа Рейнольдса $Re = 10^4 - 10^8$). При этом

частотные и волновые спектры пульсаций скорости и давлений охватывают несколько порядков.

4.2.2 Моделирование ветровых потоков рекомендуется проводить на основе численного решения уравнений Навье-Стокса в предположении постоянства плотности и вязкости воздуха и отсутствия гравитационных сил (см. Приложение Г). Этот подход является наиболее изученным и зарекомендовавшим себя в промышленных задачах [1].

4.2.3 Прямое численное решение уравнений Навье-Стокса (DNS) на данный момент недоступно для практических задач строительной аэродинамики из-за чрезмерной вычислительной сложности. Поэтому рекомендуется применять следующие упрощенные подходы:

4.2.3.1 На основе усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с замыканием моделями турбулентности (RANS). Возможен как в стационарной, так и в нестационарной постановках. Нестационарная постановка может использоваться для уточнения средних значений искомых величин, но её недопустимо использовать для прямого определения амплитуд колебаний искомых величин или их спектра. Рекомендуется использовать двухпараметрические комбинированные модели турбулентности (например, SST k- ω и GEKO k- ω [2]).

4.2.3.2 На основе отфильтрованных по пространству уравнений Навье-Стокса с подсеточными моделями турбулентности (LES). Нестационарная вихреразрешающая постановка позволяет напрямую определить статистические характеристики искомых величин. Рекомендуется использовать подсеточную модель турбулентности WALE. LES – ресурсоемкий подход, реализуемый в многопроцессорных вычислительных кластерах.

4.2.3.3 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-переключателями. Нестационарная вихреразрешающая постановка позволяет напрямую определить статистические характеристики искомых величин при условии разрешения около 80% кинетической энергии турбулентности вне пристеночных областей. Подход требует меньших вычислительных затрат, чем LES, и реализуем даже на мощных однопроцессорных системах.

4.2.4 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^+ :

$$y^+ = \frac{yu_*}{\nu_a}, \quad (4.1)$$

где y – расстояние от центра конечного объема до стенки,

u_* – динамическая скорость (см. формулу 6.6),

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 $y^+ > 1000$ на поверхностях исследуемого объекта следует избегать ввиду возможного появления нефизических эффектов в результатах.

Примечание – При использовании модифицированных функций стенки, реализованных в некоторых программных комплексах, характерные y^+ могут отличаться от приведенных выше. В таком случае следует ориентироваться на значения, приведенные в документации.

4.2.5 Использование двумерных и квазидвумерных постановок (толщиной в один конечный объем) допустимо только для предварительного анализа протяженных сооружений постоянного сечения (путепроводы, мосты и т.п.), т.к. явление турбулентности исключительно трехмерно. Результаты численного моделирования в двумерных постановках могут приводить к нефизичным эффектам в результатах (например, существенно завышать величины пульсаций).

4.2.6 Численное моделирование аэродинамики допустимо проводить в уменьшенном геометрическом масштабе ($1:K_s = 1:50-1:200$) для обеспечения лучшего функционирования моделей турбулентности и выполнения условий дискретизации пограничного слоя по y^+ . При этом следует отмасштабировать по высоте (сжать) профиль ветра на входе в расчетную область.

Интегральные нагрузки в уменьшенной модели снижены относительно полномасштабной, поэтому следует использовать формулы 5.3-5.4, учитывающие масштабный коэффициент K_s .

Физическое время счета в уменьшенной модели ускорено относительно полномасштабной, поэтому следует умножить шкалу времени на K_s .

4.3 Детализация и форма расчетной области

4.3.1 Геометрия зданий, сооружений и отдельных конструкций должна быть детализирована в соответствии с пространственной дискретизацией расчетной области. Элементы геометрии, меньшие, чем удвоенный размер конечных объемов возле поверхности объекта, должны быть удалены.

4.3.2 При наличии вокруг исследуемого объекта существующей или перспективной окружающей застройки рекомендуется учитывать её в радиусе до 500 м. Если в радиусе 1 км от объекта есть очень высокие или массивные сооружения, 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 (горная местность).

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

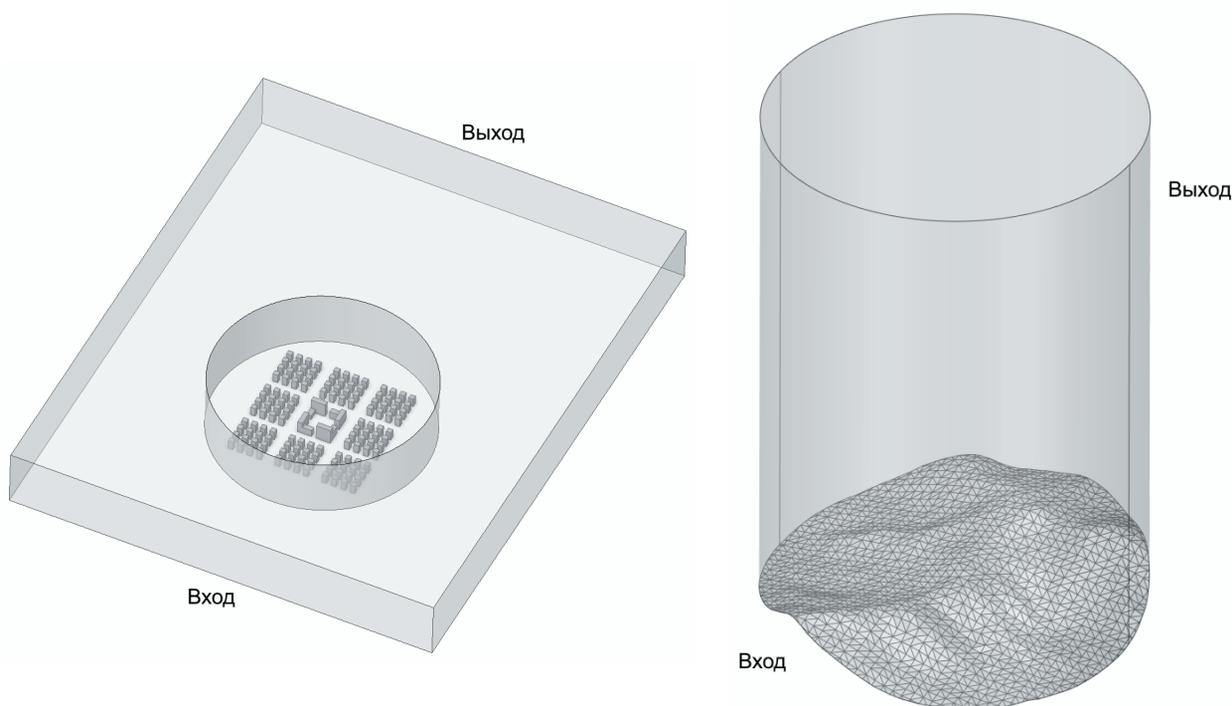
Наиболее предпочтительная форма расчетной области с учетом развитого рельефа – цилиндр (см. рисунок 4.1б). Для предотвращения нефизического ускорения или замедления ветровых потоков, обусловленного сужением или расширением расчетной области, следует обеспечить близкие значения площади поверхностей, на 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).



а) расчетная область в виде прямоугольного параллелепипеда с цилиндрическим центром для удобной смены направлений ветра

б) цилиндрическая расчетная область для сложного рельефа (без исследуемых зданий)

Рисунок 4.1 – Примеры расчетных областей

4.3.9 Для определения снеговых нагрузок особое значение имеет детализация покрытия и тех конструктивных элементов, для которых исследуется снегонакопление (например, открытые балконы, лоджии, консоли и пр.), а локальные элементы вертикальных стен могут быть упрощены.

4.3.10 Для корректного моделирования снегонакопления на покрытии в геометрической модели необходимо учитывать парапеты, вентиляционные шахты и др. выступающие непроницаемые для ветра элементы.

4.3.11 Для оценки аэроупругих эффектов рекомендуется не учитывать проницаемые элементы ограждений, мостиков и т.п.

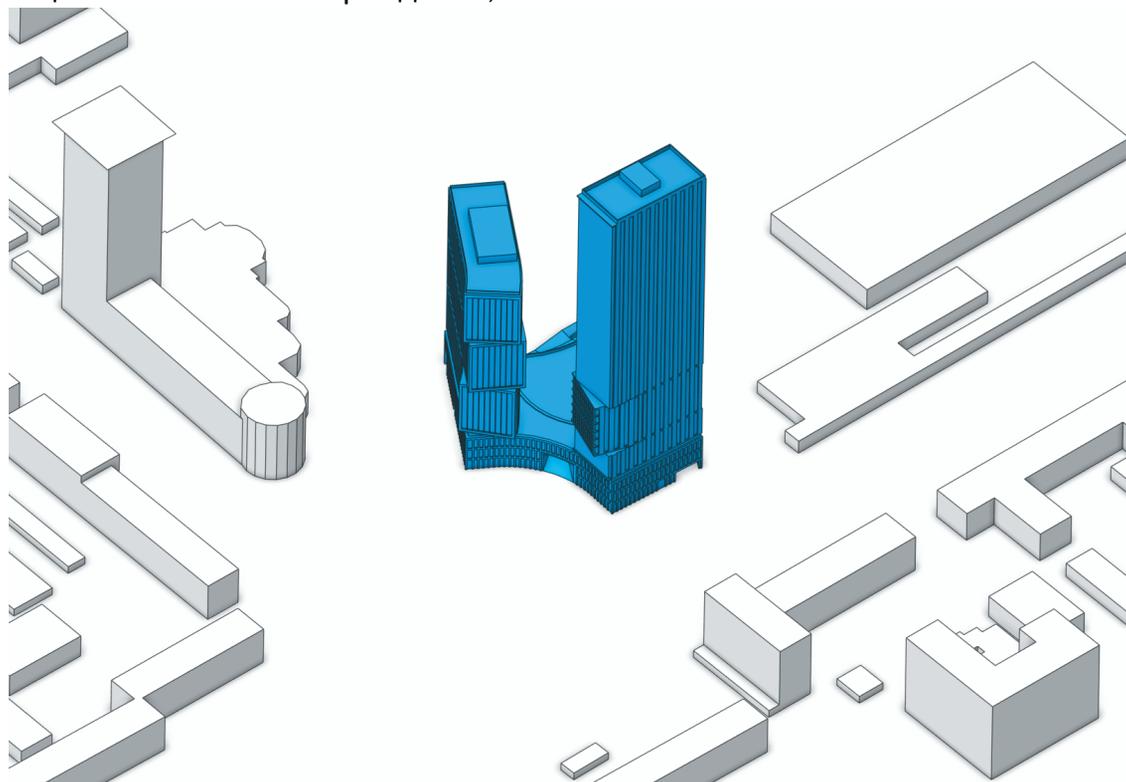


Рисунок 4.2 – Пример детализации исследуемого здания (синим) и окружающей застройки (белым)

4.4 Размеры расчетной области, граничные и начальные условия

4.4.1 Для поверхностей земли, воды, зданий и сооружений следует использовать граничное условие «стенки с прилипанием» (все компоненты скорости равны 0). Для учета влияния мелких элементов, возвышающихся над поверхностью на высоту, меньшую толщине пристеночных КО, допускается использовать специальные функции шероховатости стенки [3].

4.4.2 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.

4.4.3 «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 быть размещен на расстоянии не менее $5L$ от объекта, где L – наибольший размер проекции объекта в направлении поперек потока.

4.4.4 В качестве граничного условия на «выходе» потока из расчетной области следует использовать равенство нулю статических давлений. Использование имеющейся в ряде программных комплексов функции подавления

обратных потоков на «выходе» может улучшить сходимость решения.

4.4.5 «Выход» потока из расчетной области должен быть размещен на расстоянии не менее $2R$ от ближайшей окружающей застройки. Если окружающая застройка не учитывается или отсутствует, то «выход» должен быть размещен на расстоянии не менее $10L$ от объекта.

4.4.6 Для расчетной области в виде прямоугольного параллелепипеда в качестве граничных условий на боковых сторонах, параллельных потоку, следует использовать условие «симметрии» (скорость в нормальном направлении равна 0, и производные всех переменных в нормальном направлении равны 0).

4.4.7 Боковые стороны расчетной области в виде прямоугольного параллелепипеда должны быть размещены на расстоянии не менее R от ближайшей окружающей застройки. Если окружающая застройка не учитывается или отсутствует, то боковые стороны должны быть размещены на расстоянии не менее $5L$ от объекта.

4.4.8 В качестве граничного условия на верхней стороне расчетной области следует использовать условие «симметрии» (скорость в нормальном направлении равна 0, и производные всех переменных в нормальном направлении равны 0) или условие «стенки с проскальзыванием» (скорость в нормальном направлении равна 0).

4.4.9 Верхняя сторона расчетной области должна быть размещена на высоте не менее $3H_b$ от верхней отметки самого высокого моделируемого сооружения, где H_b – его высота.

4.4.10 Условия в п.4.4.7 и 4.4.9 дают начальные минимальные требования. Боковые и верхнюю стороны расчетной области следует разместить ещё дальше, если возле них наблюдаются значимые градиенты скоростей и давлений [5].

4.4.11 Условия в п.4.4.7 и 4.4.9 дают начальные минимальные требования. Боковые и верхнюю стороны расчетной области следует разместить ещё дальше, если объект и окружающая застройка загромождают поток более чем на 5%. Степень загромождения вычисляется по следующей формуле:

$$\Psi = \frac{S_{inlet} - \min(S_{sec})}{S_{inlet}} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

где S_{inlet} – площадь «входа», $\min(S_{sec})$ – минимальная площадь среди сечений расчетной области воздуха, перпендикулярных потоку.

4.4.12 В качестве начальных условий в нестационарных постановках рекомендуется использовать решение в стационарной постановке. Это позволит решению быстрее выйти на установившиеся колебания искомых величин.

4.5 Пространственная и временная дискретизация численных моделей

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

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

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

где ψ_{OQ} – метрика качества ортогональности КО;

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

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

$|\vec{e}_{f,i}|$ – 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.).

4.5.3 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 качества. Также он позволяет перемещать сетки без необходимости их перестроения, например для смены направлений ветра (см. рисунок 4.1а).

4.5.4 В уравнениях RANS размеры КО-сетки подбираются исходя из необходимости разрешения градиентов искомых величин в соответствующих направлениях. Вытянутые конечные объемы допустимы, но не следует использовать объемы с соотношением сторон выше 20:1 (см. рисунок 4.3а).

4.5.5 В уравнениях LES происходит фильтрация пространственного спектра по размерам конечных объемов, поэтому необходимо максимизировать количество кубических объемов и избегать вытянутых элементов [7]. Если исследуемый объект находится в аэродинамическом следе других сооружений, то между ними не должно быть укрупнения сетки, иначе вихревые структуры будут отфильтрованы и невозможно будет учесть их влияние на исследуемый объект (см. рисунок 4.3б).

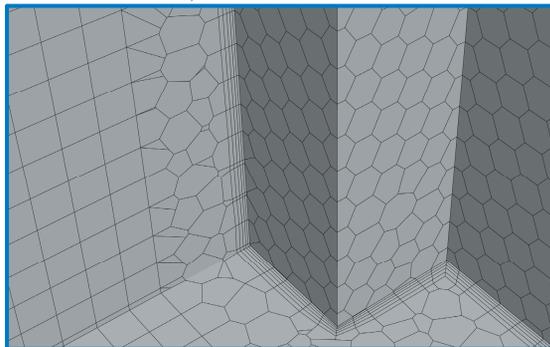
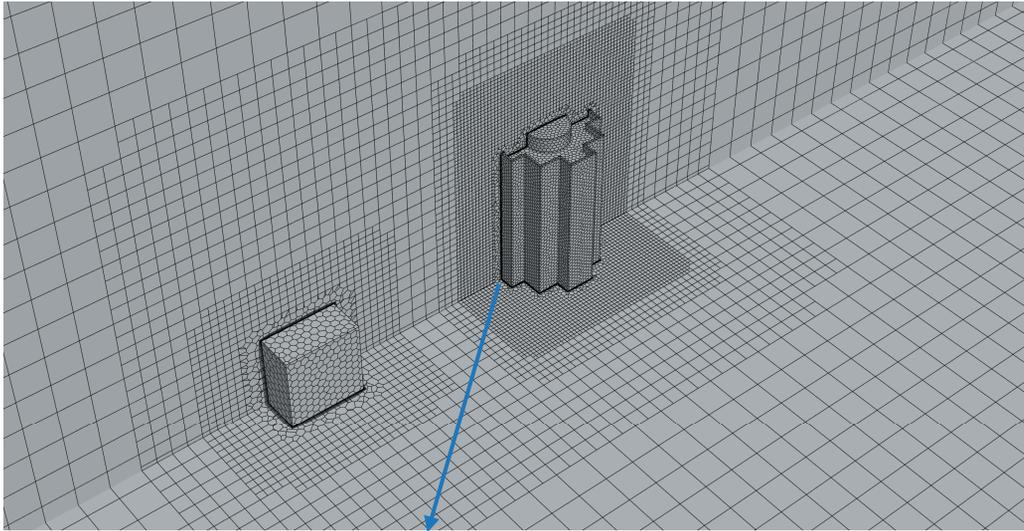
4.5.6 Для разрешения высоких градиентов у стенок необходима дискретизация пограничного слоя рядом тонких призматических объемов. Для RANS уравнений рекомендуется соотношение сторон объемов вдоль стенки и по нормали к стенке от 20:1 до 10:1, для LES уравнений – от 5:1 до 1:1. Рекомендуемое соотношение размеров объемов по нормали к стенке у соседних элементов в слое – 1,2 для RANS уравнений и 1,05-1,1 для LES уравнений. Суммарная толщина тонких призматических элементов должна охватывать всю толщину пограничного слоя.

4.5.7 Рекомендуемая степень дискретизации пограничного слоя исследуемого объекта зависит от задачи и метода решения:

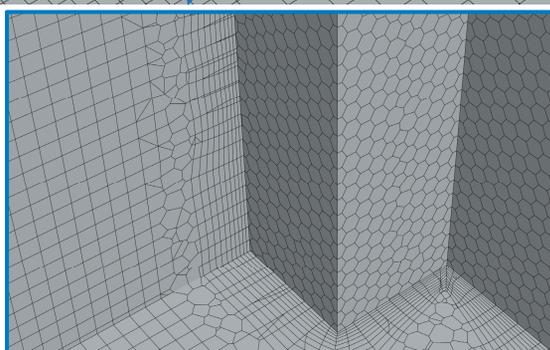
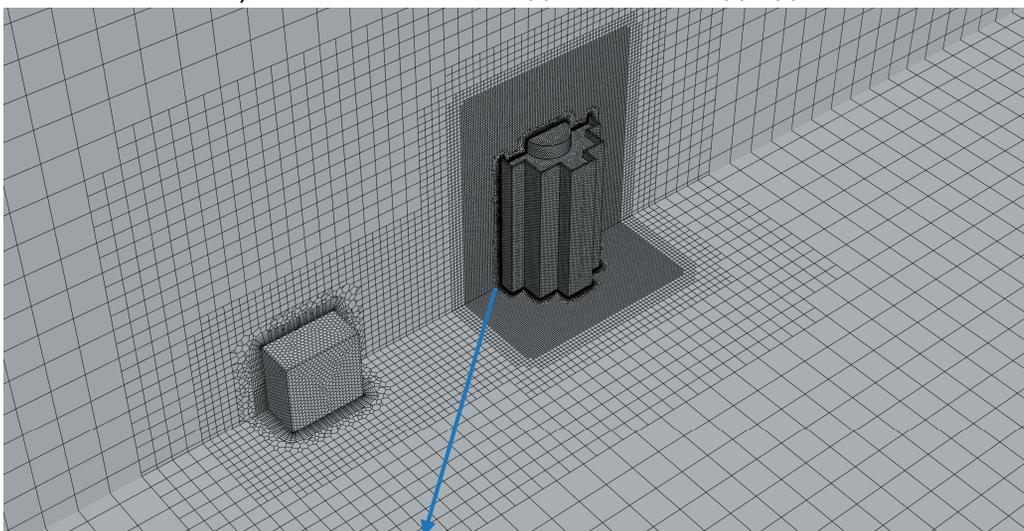
4.5.7.1 Для определения ветровых нагрузок в RANS подходе рекомендуется обеспечить $30 < y^+ \leq 1000$ на всех поверхностях.

4.5.7.2 Для определения снеговых нагрузок в RANS подходе рекомендуется обеспечить $y^+ < 5$ на покрытиях и $30 < y^+ \leq 1000$ на остальных поверхностях.

4.5.7.3 Для оценок аэроупругих эффектов в RANS подходе рекомендуется обеспечить $30 < y^+ \leq 1000$ для сечений с углами (детерминированная точка отрыва) и $y^+ \leq 1$ для гладких сечений (неизвестная заранее точка отрыва).



а) сечение КО-сетки для RANS подхода



б) сечение КО-сетки для LES или RANS-LES подходов

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

4.5.7.4 Для моделирования LES подходом следует обеспечить $y^+ \leq 1$ на всех поверхностях.

4.5.7.5 Для моделирования гибридным RANS-LES подходом следует обеспечить $y^+ \leq 5$ на всех поверхностях.

4.5.8 Размер временного шага в нестационарных постановках следует выбирать из условий Куранта CFL:

$$CFL = \Delta t \left(\frac{V_x}{\Delta x} + \frac{V_y}{\Delta y} + \frac{V_z}{\Delta z} \right), \quad (4.4)$$

где Δt – размер временного шага;

$V_{x,y,z}$ – скорость в направлениях x, y, z соответственно;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – размер КО в направлениях x, y, z соответственно.

4.5.8.1 Для RANS подхода необходимо обеспечить $CFL < 5$.

4.5.8.2 Для LES подхода необходимо обеспечить $CFL < 1$.

4.5.8.3 Для гибридного RANS-LES подхода следует обеспечить $CFL < 1$ в области LES уравнений и $CFL < 5$ в области RANS уравнений.

4.6 Требования к численным схемам

4.6.1 В RANS подходе следует применять численные схемы не менее 2-го порядка для всех уравнений, т.к. схемы 1-го порядка обладают слишком высокой численной вязкостью [8].

4.6.2 В LES подходе следует использовать центральную или ограниченную центральную разностную схему аппроксимации по пространству для уравнения моментов и ограниченную неявную схему аппроксимации по времени [9].

4.6.3 В гибридном RANS-LES подходе следует использовать центральную или ограниченную центральную разностную схему аппроксимации по пространству для уравнения моментов, схему 2-го порядка по пространству для уравнений переноса турбулентных характеристик и ограниченную неявную схему аппроксимации по времени [9]. В случаях медленной сходимости допускается использование схем 1-го порядка по пространству для уравнений переноса турбулентных характеристик.

4.6.4 В RANS подходе следует применять связанный алгоритм связи скорости и давления [8].

4.6.5 В LES и гибридном RANS-LES подходах рекомендуется применять сегрегированные алгоритмы связи скорости и давления SIMPLE или SIMPLEC. В случае проблем со сходимостью рекомендуется использовать более ресурсоемкий и устойчивый связанный алгоритм [9].

4.6.6 В RANS подходе рекомендуется использовать неявную релаксацию на основе псевдонестационарного метода. Этот метод значительно ускоряет сходимость и снижает локальные итерационные осцилляции по сравнению с вариантом применения только явной релаксации неизвестных. При этом шаг по псевдовремени следует выбирать исходя из размеров исследуемого объекта и скорости ветра.

4.6.7 Выбор значений коэффициентов явной релаксации зависит от используемого алгоритма (SIMPE, SIMPLEC, связанный) и решаемой задачи. Близкие к 1 значения коэффициентов ускоряют сходимость, но могут породить итерационные осцилляции неизвестных, а близкие к 0 – замедляют сходимость, но подавляют итерационные осцилляции. Для нестационарных LES и RANS-LES подходов обычно используются более высокие значения коэффициентов явной

релаксации, чем для RANS подхода [9].

4.7 Требования к программным комплексам

4.7.1 Решение практических задач строительной аэродинамики допустимо только в специализированных промышленных программных комплексах: ANSYS Fluent, ANSYS CFX, SimScale, STAR-CCM+, FlowVision и др.

4.7.2 Используемый программный комплекс должен иметь документацию с описанием реализованных моделей, граничных условий, численных схем и т.д.

4.7.3 Используемый программный комплекс должен иметь открытую верификационную и валидационную базу решенных задач вычислительной гидрогазодинамики.

5 Методики моделирования ветровых нагрузок

В разделе приводятся методики численного моделирования основных (средней и пульсационной составляющей) и пиковых ветровых нагрузок для зданий, сооружений и отдельных конструкций [10].

Предварительно следует отметить, что разделение ветровых нагрузок на основные и пиковые носит искусственный характер и закреплено в российских нормах, начиная с СП 20.13330.2011. Отличие между основными ветровыми нагрузками на несущие конструкции и пиковыми на фасадные конструкции обусловлено учетом одних и пренебрежением других сторон сложного физического явления ветрового воздействия. Так, при определении основных ветровых нагрузок пренебрегают амплитудами и частотами аэродинамических сил, вызванных срывами вихрей с поверхностей здания (предполагается учет этого фактора в 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 [3], 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:

$$K_{F,cor}(z) = [U_{inlet}(z)/U_{empty}(z)]^2. \quad (5.2)$$

Если $K_{F,cor}$ незначительно отклоняется от 1 для интересующих высот, то можно принять $K_{F,cor} = 1$.

5.1.5 Прохождение ветрового потока через расчетную область сопряжено с его глобальным стеснением из-за наличия обтекаемых тел. Это приводит к возникновению избыточного статического давления, которое необходимо учитывать при определении ветровых нагрузок.

Вычислять референтное значение избыточного статического давления P_{ref} необходимо в характерной точке, расположение которой определяется в соответствии со следующими принципами:

- вверх по течению ветрового потока;
- на минимальном расстоянии от учитываемой окружающей застройки, но в зоне невозмущенного препятствиями потока;

- на характерной высоте Объекта (обычно верхняя отметка).

Поясняющий пример приведен на рисунке 5.1.

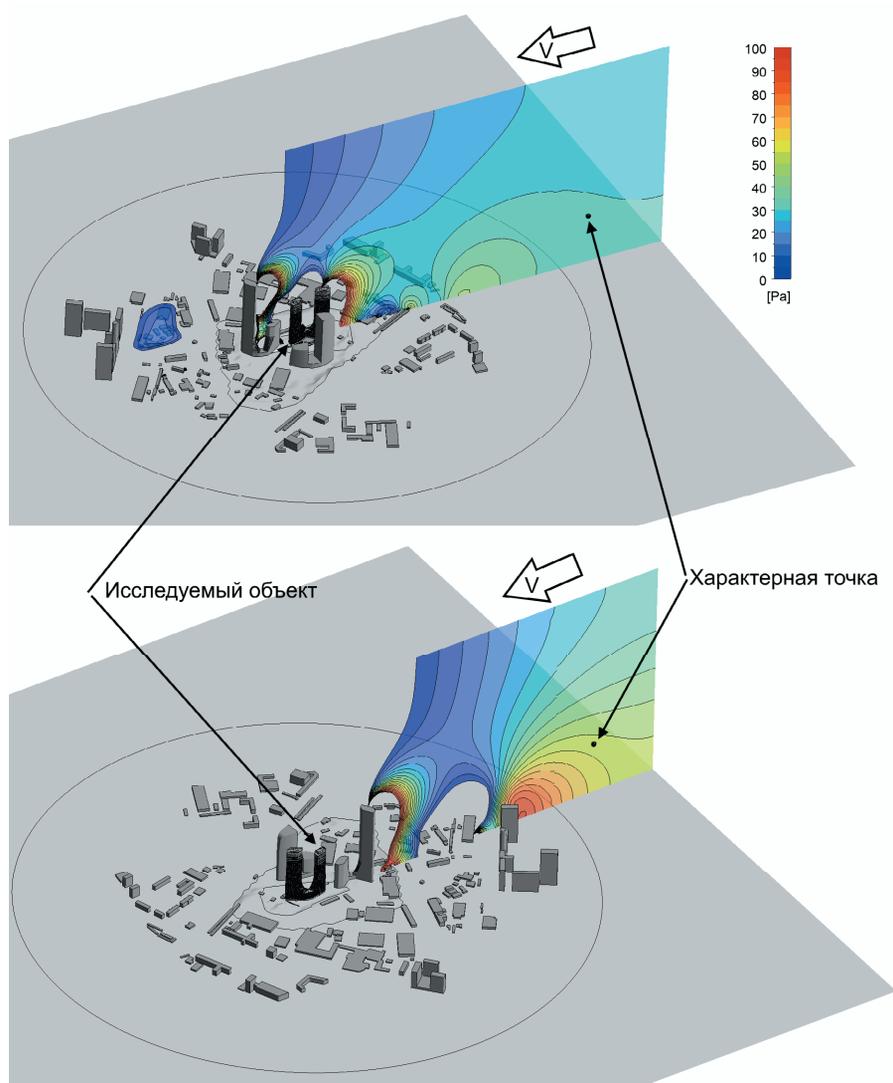


Рисунок 5.1 – Пример выбора места вычисления референтного избыточного давления для двух направлений ветра (цветами показаны изополя статических давлений от 0 до 100Па в центральном сечении)

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 статическое давление (см. раздел 5.1). Поэтому интегральные нагрузки следует вычислять по следующим формулам:

$$F_X = K_s^2 \iint_S K_{F,cor} \Delta P n_x dS; \quad F_Y = K_s^2 \iint_S K_{F,cor} \Delta P n_y dS; \quad F_Z = K_s^2 \iint_S K_{F,cor} \Delta P n_z dS; \quad (5.3)$$

$$M_X = K_s^3 \iint_S K_{F,cor} \Delta P (y n_z - z n_y) dS; \quad M_Y = K_s^3 \iint_S K_{F,cor} \Delta P (z n_x - x n_z) dS; \quad (5.4)$$

$$M_Z = K_s^3 \iint_S K_{F,cor} \Delta P (x n_y - y n_x) dS,$$

где $\Delta P = P - P_{ref}$ – относительное статическое давление, соответствующее натурным условиям нестесненного потока;

x , y , z – координаты в локальной системе координат;

n_x , n_y , n_z – координаты единичной нормали к поверхности S .

Избыточное статическое давление P_{ref} .

– не влияет на интегральные нагрузки для горизонтальных конструкций (мостовые пролеты, консоли и т.п.);

– влияет только на значения F_Z для зданий и сооружений с основанием на плоском рельефе;

– влияет на все значения интегральных нагрузок для зданий с основанием на сложном рельефе со значительным перепадом высот.

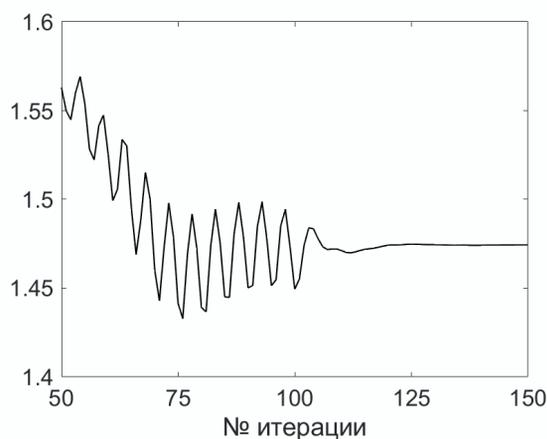
5.2.5 Для Стационарного варианта методики необходимо вычислять значимые для сооружения интегральные нагрузки (формулы 5.3 - 5.4) на каждой итерации расчета и контролировать их сходимость.

Возможны три основных сценария достижения сходимости:

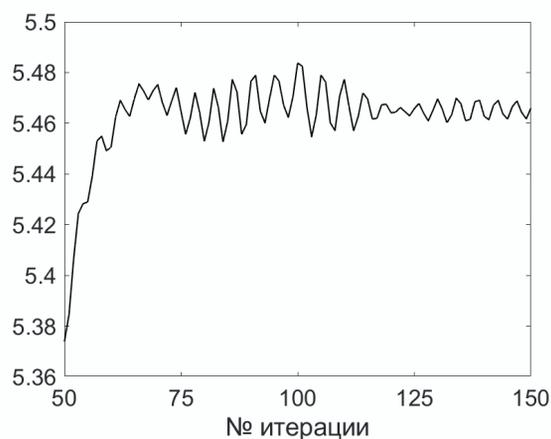
- выход контрольных значений на «плато» (см. рисунок 5.2а);
- выход на установившиеся итерационные осцилляции с малой амплитудой вокруг некоторого среднего значения (см. рисунок 5.2б);
- выход на установившиеся итерационные осцилляции со значительной амплитудой ($\geq 5\%$) вокруг некоторого среднего значения.

В последнем случае итоговые интегральные нагрузки необходимо определять усреднением по интервалу итераций установившихся осцилляций.

Установившиеся осцилляции в последнем и предпоследнем случаях должны наблюдаться не менее 5 итерационных периодов.



а) идеальная сходимость

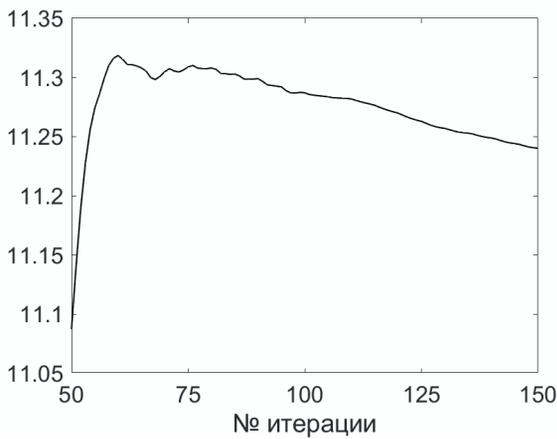


б) малые итерационные осцилляции вокруг среднего

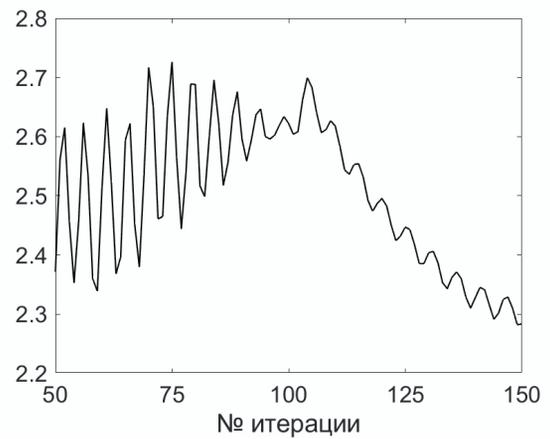
Рисунок 5.2 – Примеры достаточной сходимости контрольных величин

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 осцилляции 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).

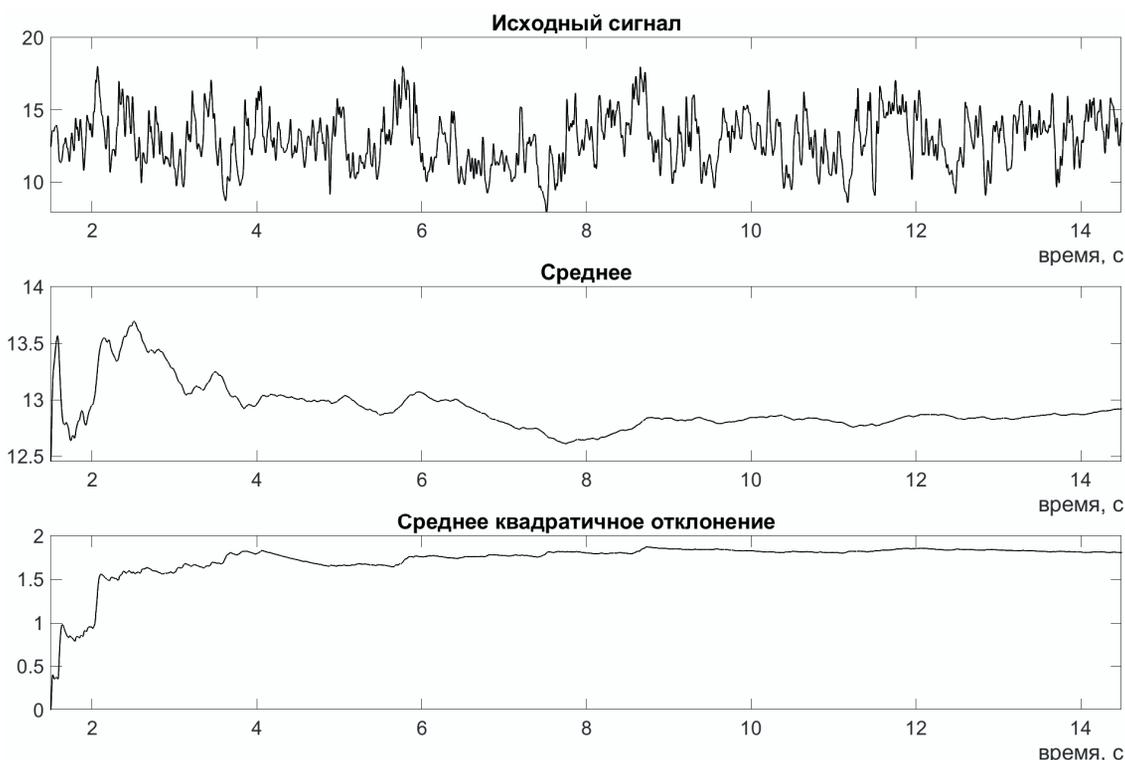


Рисунок 5.4 – Пример установившихся колебаний величины ветровой нагрузки в Нестационарном варианте методики

5.3 Позонные средние ветровые нагрузки

5.3.1 Средние ветровые нагрузки следует вычислять и приводить для зон сбора аэродинамических нагрузок для наиболее опасных направлений ветра (см. раздел 5.2) в виде усредненных по площади давлений, погонных или интегральных нагрузок.

5.3.2 При зонировании объекта следует учитывать конструктивные особенности объекта и придерживаться принципа удобства дальнейшего применения ветровых нагрузок в расчетной конечноэлементной модели для определения напряженно-деформированного состояния.

Для многоэтажных жилых и общественных зданий предпочтительны поэтажные схемы, когда в одну зону входят все поверхности от середины одного этажа до середины вышележащего (см. рисунок 5.5). Для таких зон ветровые нагрузки удобно представлять в виде погонных поэтажных нагрузок на торцы соответствующих плит перекрытий.

Для низких сооружений сложной формы со значительными размерами в плане (спортивных, культурных и т.п.) предпочтительно кусочное зонирование (см. рисунок 5.6).

При наличии деформационных швов зоны сбора аэродинамических нагрузок должны быть разделены по блокам (см. рисунок 5.6).

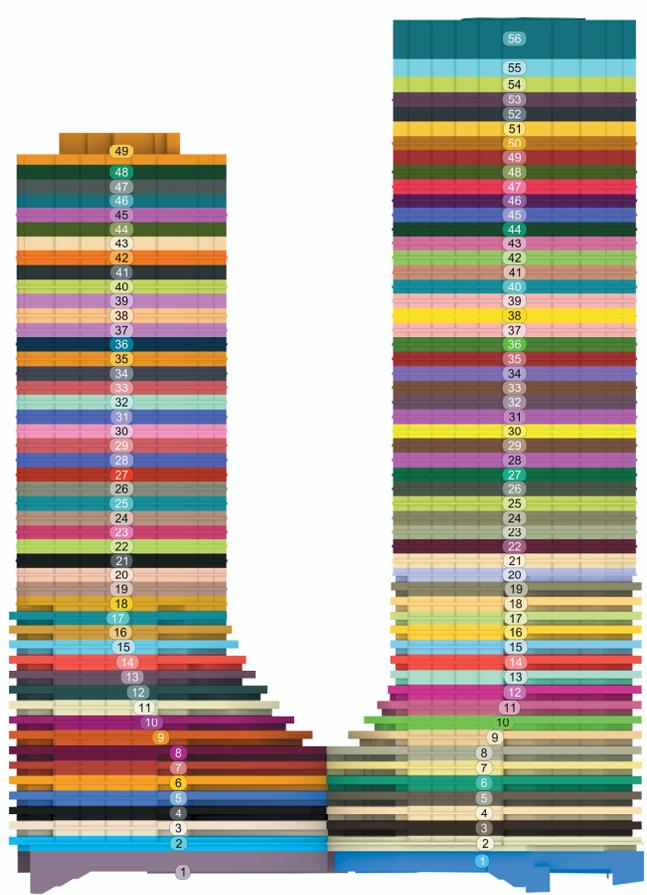
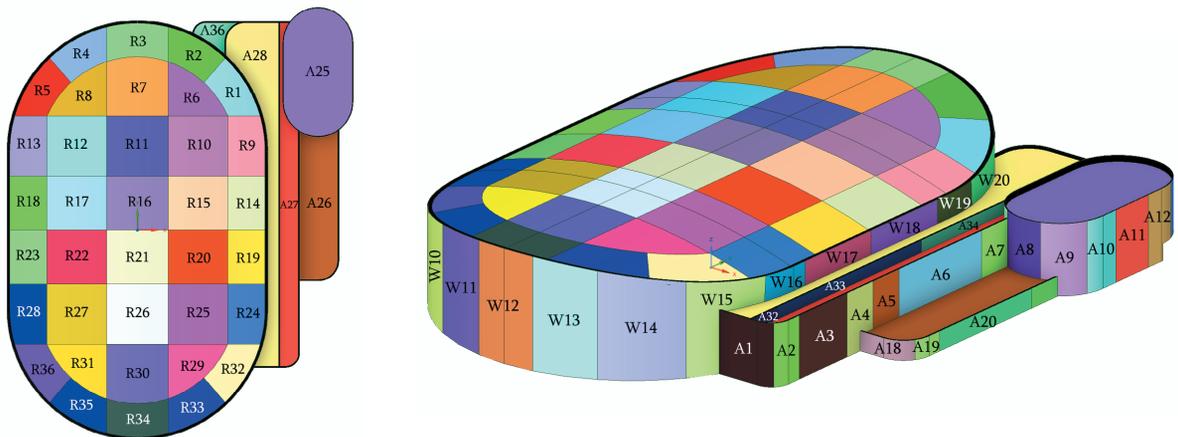


Рисунок 5.5 – Пример зонирования высотного здания



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 .

5.3.4 Поэтажные погонные ветровые нагрузки для каждой зоны сбора аэродинамических нагрузок определяются следующим образом:

$$f_x = F_x / L; \quad f_y = F_y / L; \quad (5.8)$$

$$f_\tau = \frac{M_z}{\oint_l xdy - ydx}, \quad (5.9)$$

где f_x, f_y – проекции на оси X и Y равномерно распределенной силы на торцы перекрытия, эквивалентно передающие интегральную ветровую силу на этаж;

f_τ – равномерно распределенная касательная нагрузка на периметр перекрытия, эквивалентно передающая интегральный крутящий момент на этаж;

L – периметр перекрытия, м;

$l(x,y)$ – кривая торцов перекрытия, м;

x, y – координаты кривой периметра перекрытия (начало координат в центре тяжести l);

F_x, F_y, M_z – интегральные ветровые нагрузки на зону (этаж), определяются аналогично интегральным нагрузкам на весь объект (раздел 5.2).

Разделение ветровой нагрузки на три составляющие по формулам 5.8 - 5.9 основано на предположении о высокой жесткости плиты в плоскости, что позволяет воспользоваться теоремой о замене системы сил равнодействующей силой и моментом.

Схема, поясняющая разделение сложной ветровой нагрузки на три составляющие, представлена на рисунке 5.7.

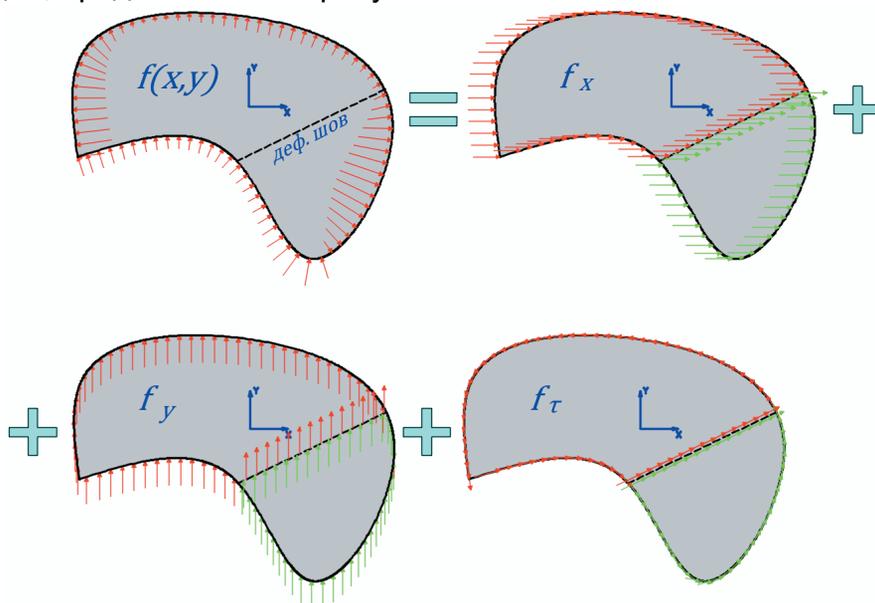


Рисунок 5.7 – Схематическая иллюстрация разложения ветровой нагрузки на перекрытие этажа на три составляющие f_x, f_y и f_τ с учетом деформационного шва

5.3.5 Для Стационарного варианта методики погонные ветровые нагрузки (формулы 5.7 - 5.9) следует вычислять на каждой итерации расчета, оценивать сходимость и усреднять по итерациям в соответствии с принципами и требованиями, изложенными в 5.2.5.

5.3.6 Для Нестационарного варианта методики необходимо вычислять погонные ветровые нагрузки (формулы 5.7 - 5.9) на каждом временном шаге 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 [12-13], используя среднюю составляющую ветровых нагрузок, полученную на основе Стационарного варианта методики.

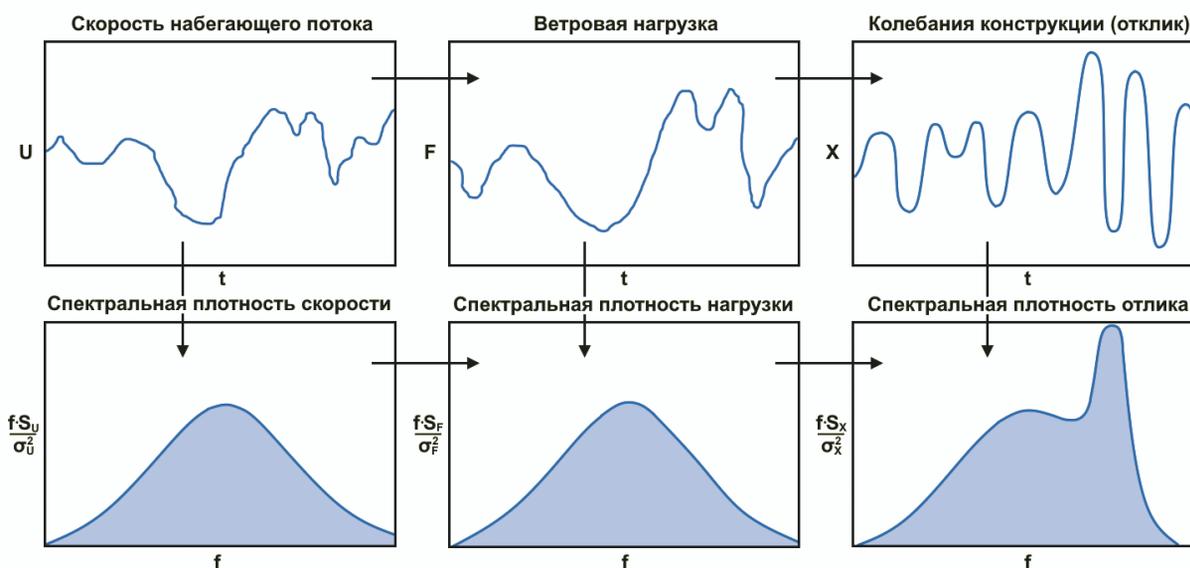


Рисунок 5.8 – Схема связей между скоростью набегающего потока, ветровой нагрузкой, динамическим откликом конструкции и соответствующими спектрами

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 экстраполяцией и характеризуют пристеночную область. Поэтому для определения пиковых ветровых давлений рекомендуются

конечнообъемные сетки с умеренной дискретизацией пограничного слоя вокруг поверхностей объекта ($30 \leq y^+ \leq 1000$).

Вычисленные значения ΔP и k корректируются путем умножения на $K_{F,cor}$.

5.5.3 Для Стационарного варианта методики поля статических давлений ΔP и кинетической энергии турбулентности k на поверхностях следует вычислять на каждой итерации расчета, постоянно контролируя сходимость в нескольких характерных точках.

Сценарии и требования к сходимости и усреднению по итерациям аналогичны приведенным в 5.2.5.

При наличии итерационных осцилляций со значимой амплитудой итоговые поля ΔP и k необходимо определять усреднением по интервалу итераций установившихся осцилляций.

5.5.4 В Стационарном подходе для каждого направления ветра вычисляются поля стандарта пульсаций давления σ_p [14]:

$$\sigma_p = (I_p^2 + 2I_p) \cdot |\Delta P|;$$

$$I_p = \sqrt{\frac{\rho_{air} k}{3|\Delta P|}}, \quad (5.10)$$

где I_p – интенсивность пульсаций давления.

Затем вычисляются поля положительных и отрицательных пиковых ветровых давлений:

$$\Delta P_+ = [1 + \zeta(z_e)] (\Delta P + \sigma_p \cdot \theta_+);$$

$$\Delta P_- = [1 + \zeta(z_e)] (\Delta P - \sigma_p \cdot \theta_-), \quad (5.11)$$

где $\zeta(z_e)$ – коэффициент пульсаций (п. 11.1.8 СП 20.13330);

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

θ_+ , θ_- – коэффициенты обеспеченности.

Рекомендуется принимать $\theta_+ = 0,5-1,0$ и $\theta_- = 1,5-3,0$ при отсутствии дополнительных данных. При наличии результатов физического моделирования или результатов Нестационарного подхода рекомендуется назначать уточненные значения.

5.5.5 Для Стационарного варианта методики при назначении пиковых ветровых нагрузок на ограждающие конструкции с грузовой площадью выше 2 м^2 следует дополнительно учитывать понижающий коэффициент корреляции согласно п. 11.2 СП 20.13330.

5.5.6 Для Нестационарного варианта методики следует вычислять поля статических давлений ΔP на каждом временном шаге расчета, контролируя сходимость в нескольких характерных точках. Локальные значения ΔP 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 ΔP на интервале времени, охватывающем минимум 2 самых длинных периода:

$$\Delta \bar{P}(M, t_i) = \frac{1}{i - m} \sum_{j=m+1}^i \Delta P(M, t_j); \quad (5.12)$$

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

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.

5.6 Аэродинамические коэффициенты давлений

5.6.1 Аэродинамические коэффициенты средних и пиковых давлений на поверхностях объекта следует определять по следующим формулам:

$$c_e = \frac{\Delta P}{Q(H_b)}; \quad c_{e,+(-)} = \frac{\Delta P_{+(-)}}{[1 + \zeta(z_e)]Q(H_b)}, \quad (5.16)$$

где $Q(H_b)$ – ветровой напор на характерной высоте H_b объекта (H_b обычно равен верхней отметке здания).

Указанный способ определения аэродинамических коэффициентов является классическим в аэродинамике.

5.6.2 Аэродинамические коэффициенты в СП 20.13330 определяются иначе. Классический аэродинамический коэффициент разделяется на составляющие: c_{norm} – безразмерная величина ветровых давлений в плане; $k(z_e)$ – коэффициент изменения средних ветровых давлений по высоте.

Аэродинамические коэффициенты по номенклатуре СП 20.13330 (во избежание путаницы обозначены как $c_{st,e}$ и $c_{st,e,+(-)}$) и классические аэродинамические коэффициенты (формула 5.16) могут быть пересчитаны друг в друга по следующим формулам:

$$c_e = \frac{\Delta P}{Q(H_b)} = \frac{w_0 k(z_e) c_{st,e}}{w_0 k(H_b)} = c_{st,e} \left(\frac{z_e}{10} \right)^{2\alpha} / \left(\frac{h}{10} \right)^{2\alpha} = c_{st,e} \left(\frac{z_e}{H_b} \right)^{2\alpha}; \quad (5.17)$$
$$c_{e,+(-)} = \frac{\Delta P_{+(-)}}{[1 + \zeta(z_e)]Q(H_b)} = \frac{w_0 k(z_e) c_{st,e,+(-)}}{w_0 k(H_b)} = c_{st,e,+(-)} \left(\frac{z_e}{H_b} \right)^{2\alpha},$$

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

α – коэффициент, зависящий от типа местности (табл. 11.3 СП 20.13330).

5.6.3 Аэродинамические коэффициенты, определенные по формуле 5.16, следует пересчитывать в ветровые давления по следующим формулам:

$$w_m = c_e Q(H_b); \quad w_{e,+(-)} = c_{e,+(-)} Q(H_b) [1 + \zeta(z_e)], \quad (5.18)$$

где $Q(H_b)$ – ветровой напор, зависящий от конкретной задачи:

$$Q(H_b) = w_0 k(H_b) \quad \text{– для нормативных ветровых нагрузок}; \quad (5.19)$$

$$Q(H_b) = \gamma_f w_0 k(H_b) \quad \text{– для расчетных ветровых нагрузок}; \quad (5.20)$$

$$Q(H_b) = \beta w_0 \quad \text{– иные значения ветровых нагрузок}, \quad (5.21)$$

где $\gamma_f = 1,4$ – коэффициент надежности по нагрузке;

$\beta = \text{const} > 0$ – коэффициент, масштабирующий величину ветровых нагрузок.

Пересчет аэродинамических коэффициентов в ветровые нагрузки, отличные от тех, для которых проводилось численное моделирование, допустим только для одинаковой формы профиля ветра (типа местности) при доказательстве автомодельности в исследуемом диапазоне скоростей.

6 Методика моделирования снеговых нагрузок

В разделе даётся краткое описание методики численного моделирования снеговых нагрузок и указания по её реализации в программных комплексах решения задач вычислительной гидрогазодинамики. В 6.1 приводятся основные сведения о процессе снегонакопления на покрытиях зданий и сооружений и факторах, влияющих на формирование снеговой нагрузки, а также даются указания по учёту вклада этих факторов для численного моделирования. В 6.2

описываются 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.

Подробное обоснование представленной методики приведено в [15].

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 [15, 20-21]. 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 нагружений.

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 [22]. 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

$U_{10,1} = 0.5 \cdot U_{10,2}$, $U_{10,2} = U_{cp}$, $U_{10,3} = 2 \cdot U_{10,2}$, где $U_{10,1}$, $U_{10,2}$, $U_{10,3}$ – скорость ветра на высоте 10 м над уровнем земли для трех характерных режимов, U_{cp} – средняя скорость ветра на высоте 10 м над уровнем земли за период со средней суточной температурой воздуха $\leq 8^\circ\text{C}$ для площадки строительства согласно табл. 3.1 либо п. 2.1 СП 131.13330.

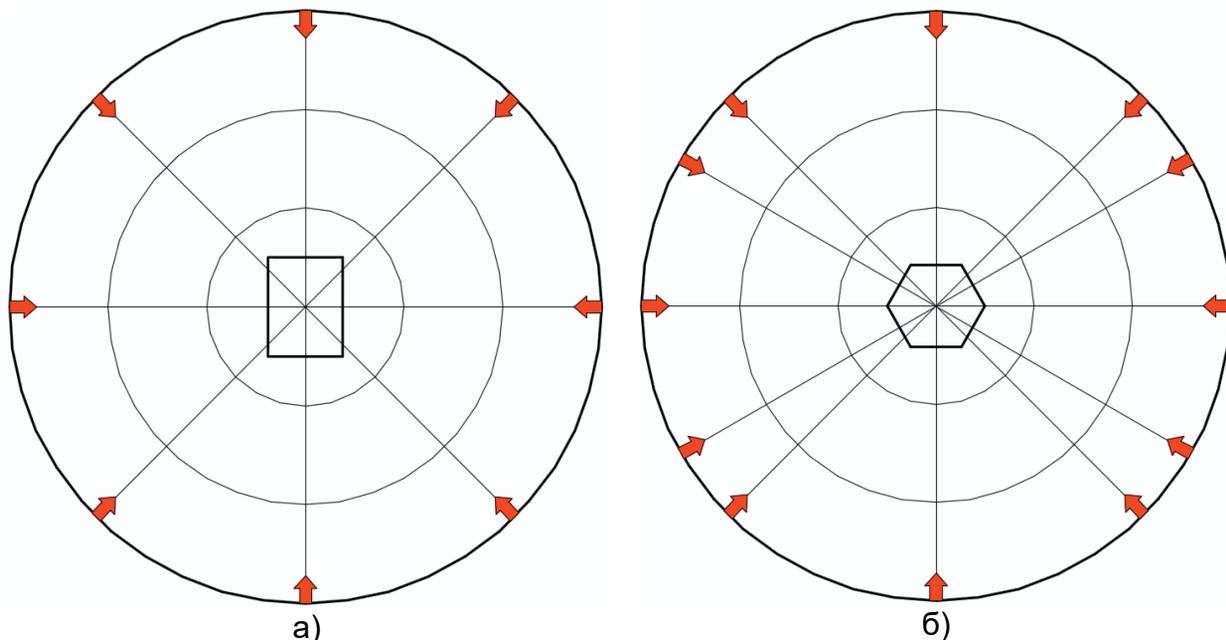


Рисунок 6.1 – Выбор расчётных направлений ветра для моделирования снеговой нагрузки: а) в общем случае; б) с дополнительными направлениями с учётом формы здания

6.2 Численное моделирование снегонакопления и снегопереноса

6.2.1 Для численного моделирования снеговой нагрузки на покрытие в стационарной постановке с использованием однофазного потока необходимо использовать модель «уноса-отложения» сальтационного слоя снегопереноса [23]. Согласно основному предположению этой модели, унос снежной массы происходит в результате действия аэродинамических сил, а отложение – в результате оседания и прикрепления частиц снега, приносимых ветровым потоком. Изменение высоты снегового покрова во времени описывается выражением:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{q_g}{\rho_s}, \quad (6.1)$$

где $h(t)$ – высота снегового покрова, м;

t – время, с;

ρ_s – насыпная плотность снега, кг/м^3 .

6.2.2 Поток обмена снежной массой между воздухом и снеговым покровом q_g описывается следующими выражениями:

$$q_g = q_+ - q_-; \quad (6.2)$$

$$q_+ = C w_f \left(1 - \frac{u_*^2}{u_t^2} \right); \quad (6.3)$$

$$q_- = A \rho_a (u_*^2 - u_t^2), \quad (6.4)$$

$$A = \zeta_p m_p, \quad (6.5)$$

где q_+ – поток отложения, кг/м²с;

q_- – поток уноса, кг/м²с;

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

w_f – средняя скорость оседания снега, м/с;

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

ζ_p – число частиц снега, уносимое единичной аэродинамической силой в единицу времени, Н⁻¹·с⁻¹;

m_p – средняя масса частицы снега, кг;

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

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

В случае отсутствия экспериментальных/натурных данных для исследуемого объекта рекомендуется использовать следующие значения констант модели [23]: $\rho_s = 300$ кг/м³, $C = 5$ г/м³, $w_f = 0,5$ м/с, $\zeta_p = 10^2$ Н⁻¹·с⁻¹, $m_p = 10^{-6}$ кг, $A = 1 \cdot 10^{-4}$ с/м.

6.2.3 Динамическая скорость u_* определяется по следующей формуле:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_a}}, \quad (6.6)$$

где τ_w – местное напряжение сдвига на поверхности, Па.

В случае отсутствия экспериментальных/натурных данных для исследуемого объекта рекомендуется использовать значение пороговой динамической скорости $u_t = 0,25$ м/с.

Если динамическая скорость 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:

$$H_s = \frac{q_+ T_+ - q_- T_-}{\rho_s}, \quad (6.7)$$

где H_s – расчетная высота снегового покрова, м;

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

6.2.5 Для исследования экстремальных значений высоты снегового покрова при ураганном ветре рекомендуется отдельно рассмотреть расчётный случай при $U_{10} = U_{\text{норм}}$ и интервалах $6 \text{ ч} \leq T_- = T_+ \leq 12 \text{ ч}$, где $U_{\text{норм}}$ – нормативная скорость ветра на высоте 10 м над уровнем земли, определяемая в зависимости от ветрового района:

$$U_{\text{норм}} = \sqrt{2w_0/\rho_a}, \quad (6.8)$$

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

6.2.6 Расчёт высоты снегового покрова выполняется по формуле (6.7), в которую подставляются значения местных напряжений сдвига τ_w , вычисленные по

результатам численного моделирования ветровых потоков над рассматриваемой поверхностью.

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):

$$\mu_{nm} = H_{roof} / H_{ground}. \quad (6.9)$$

Такой способ требует либо создания достаточно большой расчётной области, либо моделирования пустой расчётной области при тех же характеристиках снеговетрового потока, чтобы наблюдать невозмущённый процесс снегонакопления (см. рисунок 6.2).

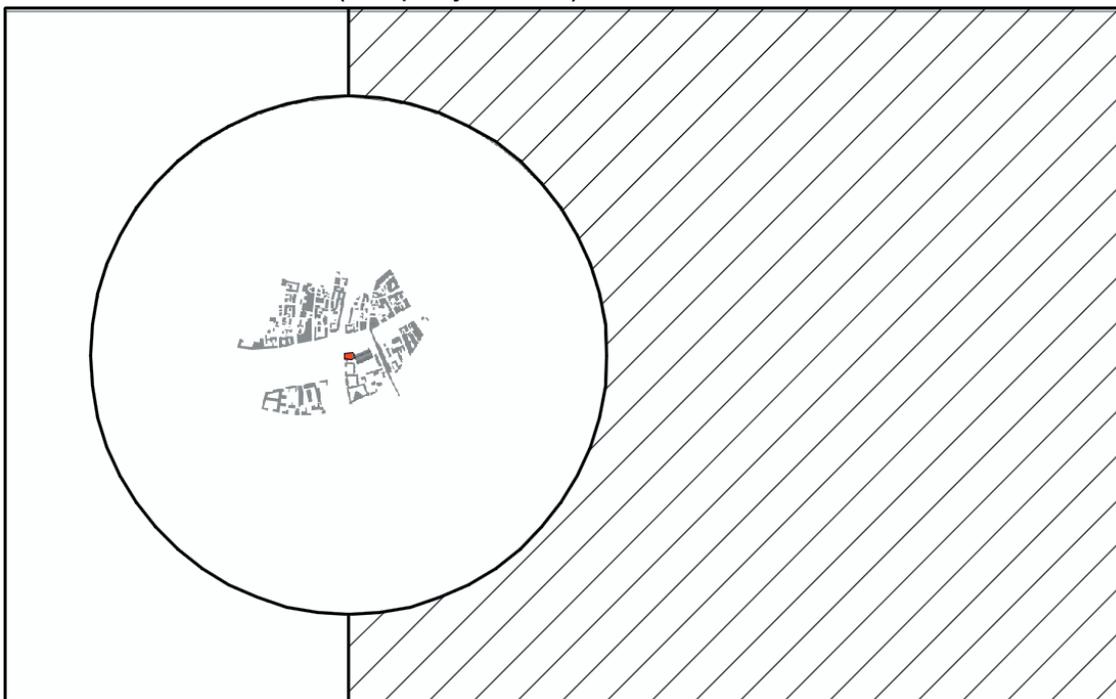


Рисунок 6.2 – Зона для поиска значения H_{ground} (показана штриховкой) в случае достаточно большой расчётной области (красным цветом выделен исследуемый объект, серым – окружающая застройка)

6.3.1.2 Коэффициент формы может быть вычислен из балансного соотношения – предположения, согласно которому интегральное значение коэффициента на покрытии должно равняться единице (т.е. снег перемещается в пределах покрытия, без ссыпания). В таком случае выражение для μ_{nm} примет вид:

$$\frac{1}{S} \iint_S \mu_{nm} dS = 1, \quad (6.10)$$

где S – площадь покрытия, м². Такой подход является упрощённым, поскольку в действительности нанос и унос снега снеговетровым потоком не всегда полностью

скомпенсированы, однако позволяет не накладывать дополнительных ограничений на расчётную область.

Предполагается, что на покрытии изначально имеется равномерно распределённое количество снега $\mu_0 = const$. Тогда выражение (6.7) принимает вид:

$$H = \frac{(\mu_{nm} - \mu_0) S_g}{\rho_s}, \quad (6.11)$$

где S_g – нормативное значение веса снегового покрова для участка строительства, определяемое в зависимости от снегового района согласно п. 10.2 СП 20.13330, кг/м².

Тогда значение численного моделируемого коэффициента μ_{nm} рассчитывается по формуле:

$$\mu_{nm} = \mu_0 + \frac{q_+ T_+ - q_- T_-}{S_g}. \quad (6.12)$$

6.3.2 Выбор между формулами (6.9) и (6.12) следует делать в пользу наиболее неблагоприятного распределения значений численно моделируемого коэффициента формы по покрытию. Значение μ_0 подбирается итерационно из условия (6.10).

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).

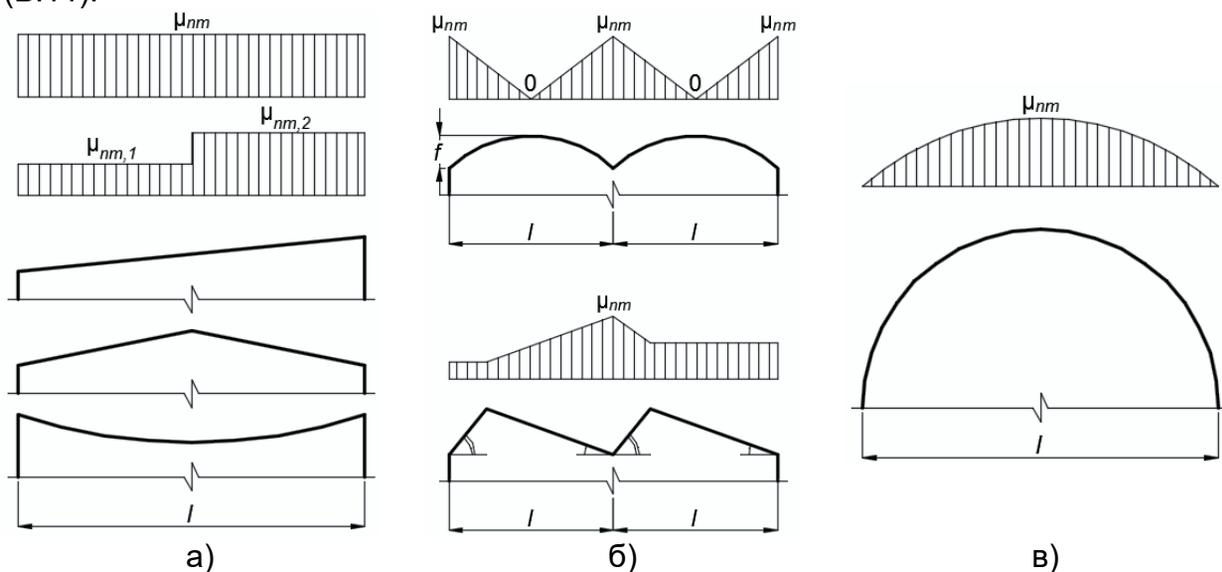


Рисунок 6.3 – Основные закономерности распределения снеговой нагрузки по покрытию

6.3.3.2 Величину снеговой нагрузки у перепадов высоты μ_h следует вычислять согласно схеме Б.9 с учётом распределения снега на верхнем ($\mu_{nm,u}$) и нижнем ($\mu_{nm,l}$) покрытии, полученном по результатам моделирования (см. рисунок 6.4).

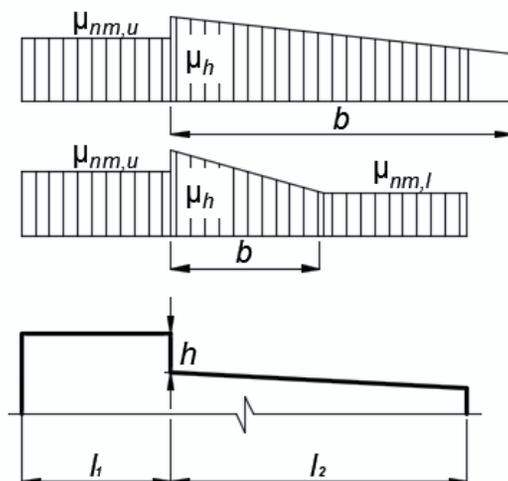


Рисунок 6.4 – Снеговая нагрузка у перепада высот с учётом результатов моделирования

6.3.3.3 Значение снеговой нагрузки на покрытие возле парапета μ_p следует вычислять согласно пункту б) схемы Б.13 с учётом численно моделируемого коэффициента формы μ_{nm} в соответствии с рисунком 6.5:

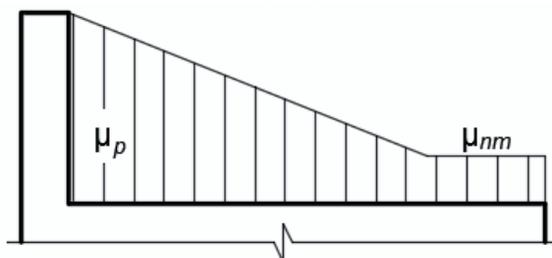


Рисунок 6.5 – Снеговая нагрузка у парапета с учётом результатов моделирования

6.3.4 Если для покрытия исследуемого объекта необходимо рассмотреть случай снеговой нагрузки, не отражённый в СП 20.13330, то допускается использовать данные нормативных документов других стран, в которых такой случай рассмотрен. В частности, к таким случаям относятся нагрузка от снега, свисающего с карниза (п. 6.3 Еврокода EN 1991-1-3 [24]), и нагрузка на трубы и кабель-каналы (п. 7.13.3 ASCE 7-22 [25]).

6.3.5 В случае если для исследуемого объекта доступны результаты как численного, так и физического моделирования, в сочетании с рекомендациями норм необходимо использовать данные обоих подходов. В настоящее время численное и физическое моделирование обладают рядом недостатков, выявляемых при их независимом применении для расчёта снеговой нагрузки. Однако совместное использование подходов позволяет во многом компенсировать эти недостатки и, на данный момент, наиболее полно описать распределение снега 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 креплениях, 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 (СП 20.13330, СП 296.1325800, СП 35.13330, ГОСТ Р 59625-2022, Eurocode EN1991-1-4 [26], CNR-DT 207/2008 [27]). 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 квазидвухмерной 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).

При определении значений аэродинамических коэффициентов для мостовых сооружений необходимо учитывать влияние земли и воды (см. п.4.4.1).

7.1.2.1 Направление осей D , L , Z (см. рисунок 7.1) должны выбираться следующим образом: ось D , вдоль которой вычисляется интегральное значение силы лобового сопротивления F_D , должна быть сонаправлена с направлением ветрового потока; ось L , вдоль которой вычисляется интегральное значение подъемной силы F_L , перпендикулярна оси D ; ось Z , вдоль которой вычисляется интегральное значение аэродинамического момента M_Z , перпендикулярна осям D и L . Расположение начала координат важно при анализе аэродинамического момента M_Z , и его следует назначать в центре тяжести вертикальных поверхностей конструкции.

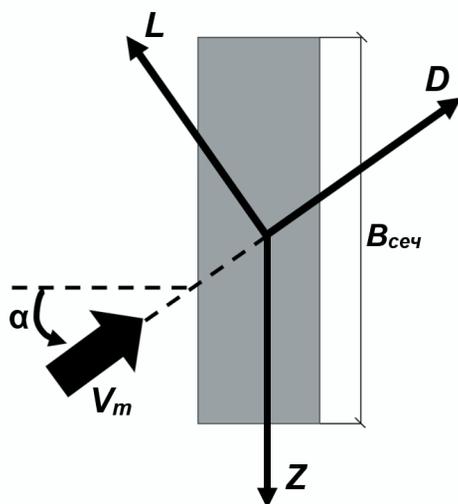


Рисунок 7.1 – Расположение осей D , L , Z

7.1.2.2 При построении зависимости коэффициента аэродинамического момента положительное направление вращения угла атаки ветра α должно совпадать с положительным направлением вращения аэродинамического момента M_Z (см. рисунок 7.2).

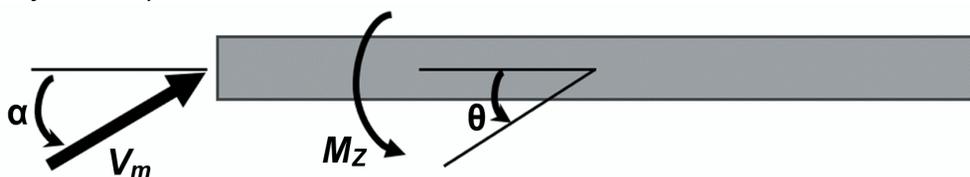


Рисунок 7.2 – Пояснение выбора направления угла атаки α

7.1.2.3 Коэффициенты силы лобового сопротивления C_D , подъемной силы C_L и аэродинамического момента C_{M_Z} определяются по формулам:

$$C_D = \frac{F_D}{QS_{\text{сеч}}}; \quad (7.1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{QS_{\text{сеч}}}; \quad (7.2)$$

$$C_{M_z} = \frac{M_z}{QS_{сеч}B_{сеч}}, \quad (7.3)$$

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

V_m – скорость ветра на характерной высоте H_b объекта, 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.

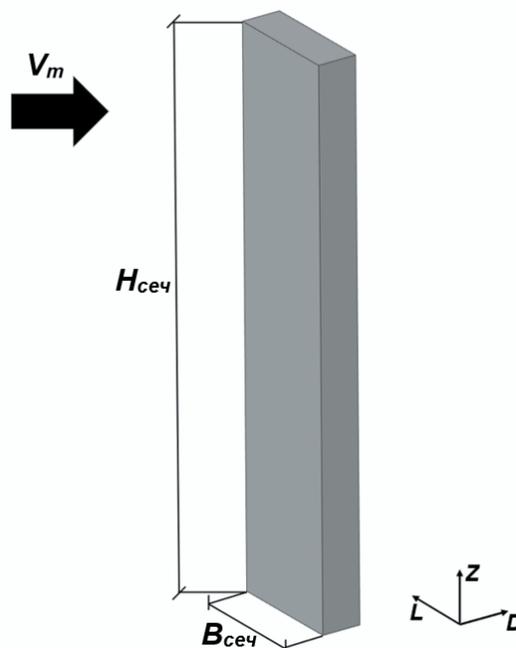


Рисунок 7.3 – Характерная площадь поперечного сечения $S_{сеч}$ ($S_{сеч} = B_{сеч}H_{сеч}$) и характерный поперечный размер сечения B

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).

7.1.3.4 Зависимость подъемной силы от времени является дискретной функцией: $\bar{F}_L = [F_L(t_k)]$, $k \in [0, N_t - 1]$. Значения $F_L(t_k)$ зафиксированы в моменты времени t_k , $k \in [0, N_t - 1]$ и в общем случае распределены неравномерно.

Для вычисления преобладающих частот срыва вихрей и соответствующих амплитуд подъемной силы необходимо использовать преобразование Фурье. В случае неравномерного дискретного шага по времени следует использовать NUDFT (non-uniform direct Fourier transform, неоднородное быстрое преобразование Фурье) – неравномерное прямое преобразование Фурье.

Чтобы исключить нулевую частоту из спектра, необходимо предварительно преобразовать \bar{F}_L в ряд с нулевым средним значением:

$$\tilde{F}_L(t_k) = F_L(t_k) - \frac{1}{N_t} \sum_{n=0}^{N_t-1} F_L(t_n); \quad k \in [0, N_t - 1]. \quad (7.4)$$

Последовательность частот $f_{F_L,k}$, на которых вычисляется преобразование:

$$f_{F_L,k} = -\frac{N_t}{2} + k\Delta F; \quad k \in [0, N_t - 1], \quad (7.5)$$

где

$$\Delta F = \frac{1}{T}; \quad T = t_{N_t-1} - t_0. \quad (7.6)$$

Комплексная амплитуда функции \tilde{F}_L , полученная через преобразование Фурье:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N_t-1} \tilde{F}_L(t_n) \exp(-2\pi i f_{F_L,k} t_n); \quad k \in [0, N_t - 1], \quad (7.7)$$

где i – мнимая единица.

Левая половина спектра (для $f_{F_L,k} < 0$) не учитывается при анализе.

Амплитуда подъемной силы $F_{L,ampl}$ для соответствующей частоты $f_{F_L,k}$ равна:

$$F_{L,ampl} = 2 \frac{|X_k|}{N_t}. \quad (7.8)$$

7.1.3.5 Для оценки возможности возникновения вихревого возбуждения среди частот $f_{F_L,k}$ выбираются $f_{F_L,j}$, для которых значения $F_{L,ampl}$ являются максимальными.

7.1.3.6 Амплитуды колебаний аэродинамического коэффициента подъемной силы $C_{L,ampl}$ определяются по формуле (7.2). Числа Струхала Sh_j определяются по формуле:

$$Sh_j = \frac{f_{F_L,j} B_{сеч}}{V_m}. \quad (7.9)$$

7.2 Оценка возможности возникновения галопирования

7.2.1 На основе полученных зависимостей коэффициентов силы лобового сопротивления $C_D(\alpha)$ и подъемной силы $C_L(\alpha)$ от углов атаки/направлений ветра

определяется коэффициент a_g :

$$a_g(\alpha) = \frac{dC_L}{d\alpha} + C_D. \quad (7.10)$$

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):

$$a_g(\alpha) \leq 0. \quad (7.11)$$

Для уточнения диапазонов из условия 7.11 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 (7.11), вычисляется критическая скорость возникновения галопирования:

$$V_g = \frac{2f_{узз,1} B_{сеч} Sc}{a_g}, \quad (7.12)$$

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

Sc – число Скратона:

$$Sc = \frac{2\delta_s m_{e,1}}{\rho_a B_{сеч}^2}, \quad (7.13)$$

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

δ_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:

$$V_g < 1,25V_{max}(z_e), \quad (7.14)$$

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

$$V_{max}(z_e) = \sqrt{\frac{2w_0 k(z_e) \gamma_f}{\rho_a}}, \quad (7.15)$$

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:

$$\frac{dC_{Mz}}{d\alpha} \leq 0. \quad (7.16)$$

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.

Для уточнения диапазонов из условия 7.16 следует исследовать дополнительные углы атаки/направления ветра α в зоне смены знака $dC_{Mz}/d\alpha$.

7.3.2 Для углов атаки/направлений ветра, при которых выполняется условие (7.16), вычисляется критическая скорость возникновения дивергенции:

$$V_{div} = \sqrt{-\frac{2GJ_t}{\rho_a B_{сеч}^2 \frac{dC_{Mz}}{d\alpha}}}, \quad (7.17)$$

где GJ_t – крутильная жесткость; G – модуль сдвига материала, Па;

J_t – крутящий момент инерции поперечного сечения, m^4 (см. Приложение Б);

$dC_{Mz}/d\alpha$ – угловая производная от коэффициента аэродинамического момента C_{Mz} , рассчитанная для фиксированного значения угла атаки α .

7.3.3 Аэроупругая неустойчивость конструкции типа дивергенции возникает в том случае, если выполняется условие:

$$V_{div} < 2V_{max}(z_e), \quad (7.18)$$

где $V_{max}(z_e)$ – см. уравнение 7.15.

7.4 Вихревое возбуждение

7.4.1 Критическая скорость возникновения вихревого возбуждения для i -ой изгибной собственной частоты конструкции f_i определяется по формуле:

$$V_{cr,i} = \frac{k_v f_i B_{сеч}}{Sh}, \quad (7.19)$$

где k_v – коэффициент, учитывающий эффект захвата собственной частоты колебаний.

7.4.2 Для каждой i -ой изгибной собственной частоты конструкции f_i и для каждого характерного числа Струхала Sh_j (см. п. 7.1.3.5) определяется диапазон критических скоростей возникновения вихревого возбуждения:

$$\frac{0,9f_i B_{сеч}}{Sh_j} \leq V_{cr,i}^k \leq \frac{1,1f_i B_{сеч}}{Sh_j}. \quad (7.20)$$

7.4.3 Аэроупругая неустойчивость конструкции типа вихревого возбуждения возникает в том случае, если выполняется условие:

$$V_{cr,i}^k < V_{max}(z_e), \quad (7.21)$$

где $V_{max}(z_e)$ – см. уравнение 7.15.

7.4.4 Итоговая критическая скорость принимается равной наибольшему значению, удовлетворяющему условиям 7.20 – 7.21. Данная скорость используется при пересчете безразмерного коэффициента C_L в подъемную силу F_L в соответствии с уравнением 7.2:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_a V_{cr,i}^k S_{сеч} \quad (7.22)$$

7.4.5 Отклик конструкции (амплитуды перемещения, скорости и ускорения) на вихревое возбуждение следует определять на основе гармонического анализа (Приложение Б). Полученная нагрузка (см. 7.4.4) используется для дальнейшего анализа в качестве амплитуды ветровой нагрузки при вихревом возбуждении.

7.5 Прямое связанное моделирование аэроупругости

7.5.1 Оценки по методикам, представленным в 7.2 – 7.4, являются предварительными. Для надежного опровержения/подтверждения возможности возникновения опасных аэроупругих явлений необходимо проведение поверочного двухстороннего связанного расчета.

7.5.2 Двухсторонний связанный расчет осуществляется с помощью технологии FSI (Fluid Structure Interaction), которая позволяет моделировать 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 определяется расположение границы контакта и, при наличии изменений расположения границы, производится перестроение/обновление КО-сетки, а затем решается задача аэродинамики.

7.5.4 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.

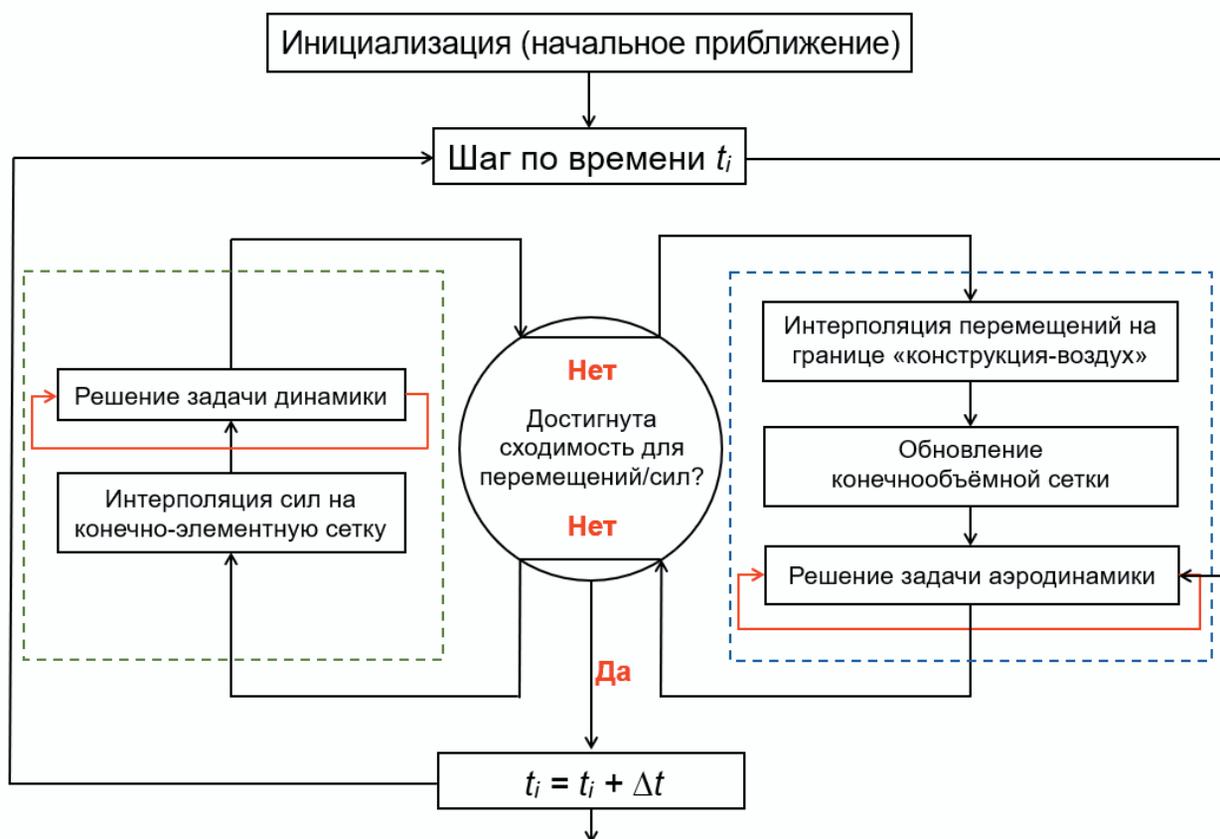
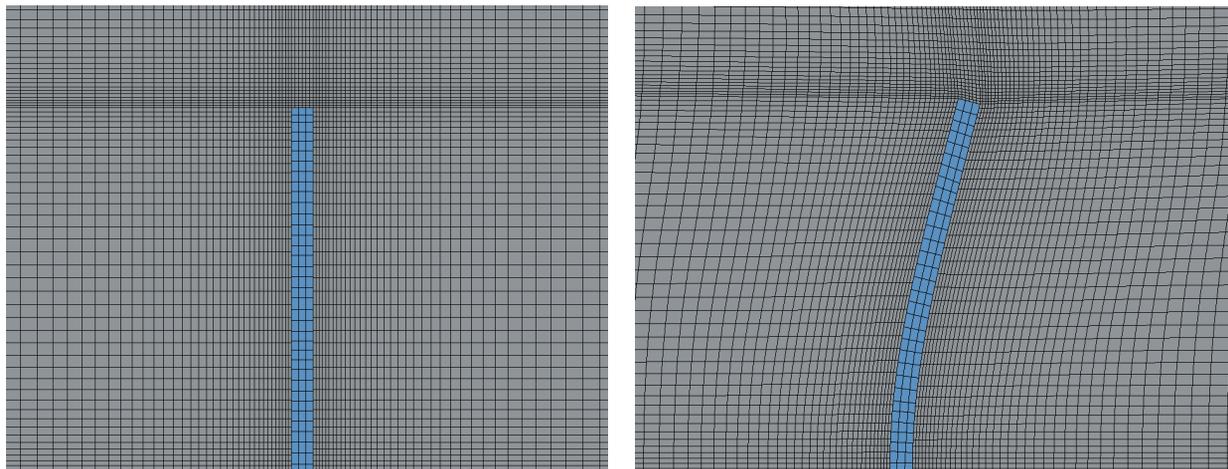


Рисунок 7.4 – Процедура решения для двухстороннего связанного (сопряженного) расчета

7.5.5 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.



а) начальный момент времени

б) деформация сетки в фиксированный момент времени

Рисунок 7.5 – Пример деформированной КО-сетки и КЭ-сетки для двухстороннего связанного (сопряженного) расчета (синий цвет – КЭ-сетка, серый цвет – КО-сетка)

8 Принципы гибридного моделирования

Гибридное моделирование для задач строительной аэродинамики – это взаимосвязанные работы по определению искомым величин (ветровые и снеговые нагрузки, скорости ветра, спектры пульсаций давлений и скоростей и др.) на основе результатов численного и физического моделирования. В некоторых источниках также можно встретить термины синонимы: комплексное или композитное моделирование.

Гибридное моделирование позволяет компенсировать несовершенства и ограничения отдельного численного или физического моделирования, а в ряде случаев достичь эффекта синергии. Например, на основе только физического моделирования невозможно проводить пространственное интегрирование ветровых нагрузок, определять давления на открытые тонкостенные конструкции и др. В гибридном подходе математические модели могут быть откалиброваны по экспериментальным данным в характерных точках, что позволит совместить полноту и наглядность численного моделирования с достоверностью физического.

Технические ограничения эксперимента часто не позволяют полноценно физически смоделировать такие явления, как снегонакопление или аэроупругие колебания. Численное моделирование дает дополнительную информацию об исследуемых явлениях, что позволяет разработать более обоснованные выводы и рекомендации.

Методики численного моделирования, а также требования, принципы верификации и валидации численных моделей представлены в разделах 4 – 7 настоящего стандарта и приложениях к нему. Несколько устаревшая методика численного моделирования с примерами решения реальных задач представлена в Методическом пособии [11]. Фрагменты возможностей и требований к численному моделированию представлены в ГОСТ Р 56728-2015 и ГОСТ Р 59625-2022.

Требования к физическому моделированию в АДТ представлены в Приложениях Ж и И к СП 20.13330, ветровых нагрузок на ограждающие конструкции – в ГОСТ Р 56728-2015, аэроупругой неустойчивости мостовых сооружений – в ГОСТ Р 59625-2022. Подробные требования и методики представлены в иностранном стандарте ASCE/SEI 49-21 [28].

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

Раздел содержит возможности, требования и рекомендации по гибриднему 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 [14] 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 Численное моделирование снегонакопления рекомендуется проводить для разных скоростных режимов набегающего потока (см. п. 6.1.4, 6.2.5) с целью выявления соответствующих закономерностей. Это позволяет качественно дополнить результаты физического моделирования снегонакопления, ограниченного узким диапазоном скоростей ветра.

8.1.9 Для корректного использования и сопоставления с результатами численного моделирования частот и амплитуд колебаний интегральных аэродинамических сил, определенных на основе физического моделирования, необходимо оценить и отфильтровать части сигнала, вызванные колебаниями аэродинамической трубы и макета.

8.1.10 Методики оценки возможности возникновения аэроупругих эффектов, представленные в 7.2 – 7.4, могут быть реализованы как на основе численного, так и физического моделирования [29].

8.1.11 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.

8.1.12 Прямые аэроупругие расчеты (см. 7.5) могут использоваться для уточнения результатов физического моделирования на секционных моделях.

8.2 Разработка рекомендаций по результатам гибридного моделирования

8.2.1 Аэродинамические коэффициенты и числа Струхаля, определяемые в результате численного и физического моделирования, должны быть вычислены по явно указанным одинаковым формулам (единый принцип обезразмеривания).

8.2.2 Результаты численного и физического моделирования по возможности должны быть представлены в единой номенклатуре (например, таблицы по соответствующим зонам) и единицах измерения.

8.2.3 Рекомендуемые для оценки механической безопасности объекта направления ветра для физического моделирования ветровых нагрузок могут быть приняты по результатам анализа интегральных нагрузок в численных моделях.

8.2.4 Для локальных зон (например, места отрыва и присоединения потока) результаты численного и физического моделирования ветровых нагрузок могут значительно отличаться. Это может быть связано как с недостатками моделей турбулентности, так и с отсутствием автомодельности в указанных зонах. Такие случаи должны быть отдельно отмечены и проанализированы.

8.2.5 При выполнении расчетных исследований по оценке механической безопасности значения ветровых нагрузок, определенные по результатам физического и численного моделирования (в случае значимых локальных отличий), должны быть учтены в составе расчетных сочетаний нагрузок как взаимоисключающие загрузки.

8.2.6 Из-за ограничений физического и численного моделирования, результаты одного из подходов могут быть использованы для дополнения результатов другого. Например, значения ветровых нагрузок могут включать численно определенные коэффициенты корреляции и экспериментально определенные аэродинамические коэффициенты.

8.2.7 Схемы расчётного коэффициента формы μ должны учитывать результаты как физического, так и численного моделирования снеговых нагрузок [15] с учётом рекомендаций нормативных документов в соответствии с принципами, изложенными в пунктах 6.3.3 и 6.3.4 настоящего стандарта.

8.2.8 В силу различий в методологии и технической реализации методов физического и численного моделирования снеговых нагрузок, в результатах, полученных с помощью каждого из подходов для одного и того же расчётного случая, могут наблюдаться локальные несовпадения. В пределах таких зон рекомендуется составить отдельные схемы расчётного коэффициента формы μ в том случае, если выявленные несовпадения невозможно обобщить единой схемой.

8.2.9 Полученные в результате численного и физического моделирования оценки возможности возникновения аэроупругих эффектов по методикам 7.2 – 7.4 должны быть сопоставлены, а рекомендации даны по наимудшим случаям.

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 [30-32].

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 растет по мере уменьшения погрешности.

Истинные значения искомым 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:

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

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

После проведения оценок погрешностей численно моделируемые значения могут быть скорректированы:

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

а соответствующие погрешности и неопределенности будут равны:

$$\delta_{S_c} = S_c - T = \delta_{SM} + \varepsilon_{SN}; \quad (\text{A.5})$$

$$U_{S_c}^2 = U_{SM}^2 + U_{S_cN}^2, \quad (\text{A.6})$$

где U_{S_c} – неопределенность скорректированных значений;

U_{S_cN} – неопределенность оценки ε_{SN} .

Схематически связь значений искомой величины и соответствующих погрешностей представлена на рисунке А.1.

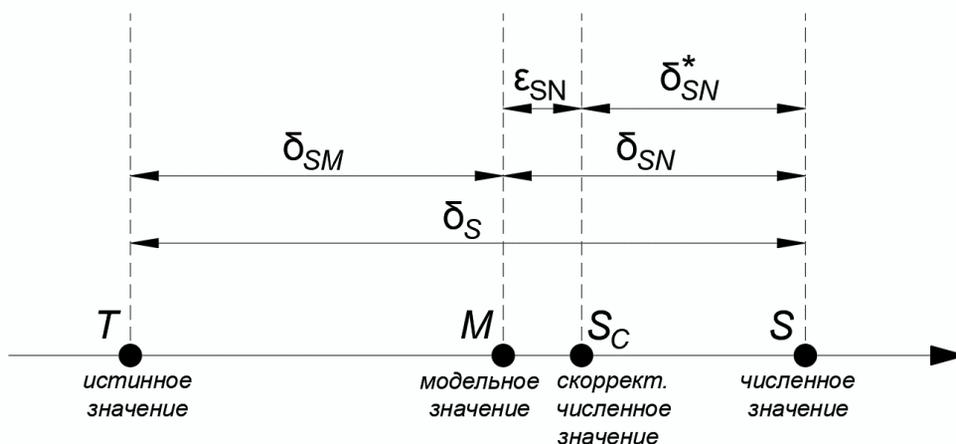


Рисунок А.1 – Связь истинного, модельного и численного значений искомой величины

Верификация – процедура определения численной неопределенности U_{SN} и, если возможно, оценка знака и величины численной погрешности δ_{SN}^* , а также неопределенности этой оценки ε_{SN} .

Валидация – процедура определения модельной неопределённости U_{SM} с помощью эталонных экспериментальных данных и, если возможно, определение знака и величины модельной погрешности δ_{SM} . Полноценная валидация возможна только при условии оценки погрешности и неопределенностей экспериментальных данных [33].

Верификация и валидация численных моделей – трудоемкий процесс, который зачастую не уместается в диктуемые строительной индустрией сроки. Обычно верификация физических моделей не проводится по тем же причинам. Такое положение дел приводит к снижению качества численного и физического моделирования, неопределенной надежности получаемых результатов.

Набор верификационных и валидационных исследований различных задач строительной аэродинамики, опубликованных организацией (за авторством действующих специалистов-аэродинамиков) в ведущих рецензируемых научных журналах по строительной аэродинамике, является основным механизмом, легитимизирующим её деятельность при научно-техническом сопровождении.

А.1 Процедура верификации

А.1.1 Верификация подтверждает, что аэродинамические исследования проводились на качественной численной модели, а результаты отражают заложенную в неё математическую модель с достаточной для практических целей

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

A.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.).

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

A.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.

A.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.

A.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).

A.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 .

A.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 [30-32].

A.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.

А.1.10 В нестационарной постановке рекомендуется оценивать погрешности и неопределенности основных статистических характеристик искомых величин: среднего и среднего квадратического отклонения.

А.2 Процедура валидации

А.2.1 Валидация проводится после процедуры верификации численной модели.

А.2.2 Валидация может проводиться при наличии экспериментальных данных, для которых подробно описаны условия эксперимента, методы обработки показаний датчиков и проведена процедура верификации (оценка погрешностей и неопределенностей физического моделирования [33]). При отсутствии верификации результатов физического моделирования сопоставление с экспериментальными данными все же может быть проведено, но это не будет иметь валидационного значения.

А.2.3 Валидация на натурных данных для проектируемого объекта невозможна, а для существующего – практически невозможна, т.к. требует длительных и дорогостоящих замеров на реальном объекте. На практике валидация численной модели проводится по экспериментальным данным из АДТ.

А.2.4 Для корректной валидации необходимо, чтобы численная модель воспроизводила физическую модель в АДТ: геометрический масштаб, расчетную область в виде рабочей зоны АДТ, профиль набегающего потока, упрощения исследуемого объекта, макеты окружающей застройки и рельефа.

А.2.5 Разница между значениями, полученными в физическом моделировании D и численном моделировании S , равна разности соответствующих погрешностей:

$$E = D - S = (T + \delta_D) - (T + \delta_S) = \delta_D - \delta_S, \quad (\text{A.9})$$

где δ_D – погрешность физического моделирования.

Соответствующая неопределенность:

$$U_E^2 = U_D^2 + U_S^2 = U_D^2 + U_{SM}^2 + U_{SN}^2, \quad (\text{A.10})$$

где U_D – неопределенность физического моделирования.

А.2.6 Валидация полностью достигнута, если $|E| < U_E$ (результаты укладываются в «уровень шума»). Схема валидационного сопоставления аэродинамических коэффициентов представлена на рисунке А.2 (по экспериментальным значениям D_2 и D_3 валидация полностью достигнута, а по значению D_1 – нет).

Подробно одна из методик валидации представлена в [30-32].

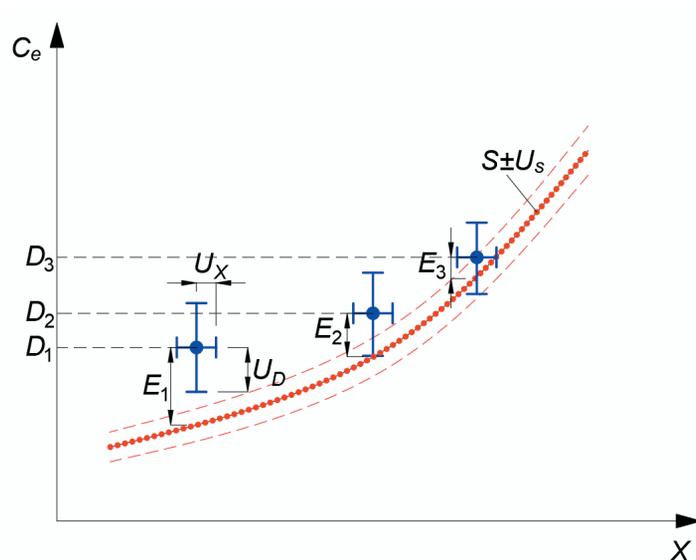


Рисунок А.2 – Результаты численного (красный) и физического (синий) моделирования аэродинамических коэффициентов C_e с оценкой неопределенностей, X – некоторая координата

А.2.7 Валидация может выступать обоснованным способом подбора модели турбулентности для решения соответствующего типа задач (см. рисунок А.3 [14]).

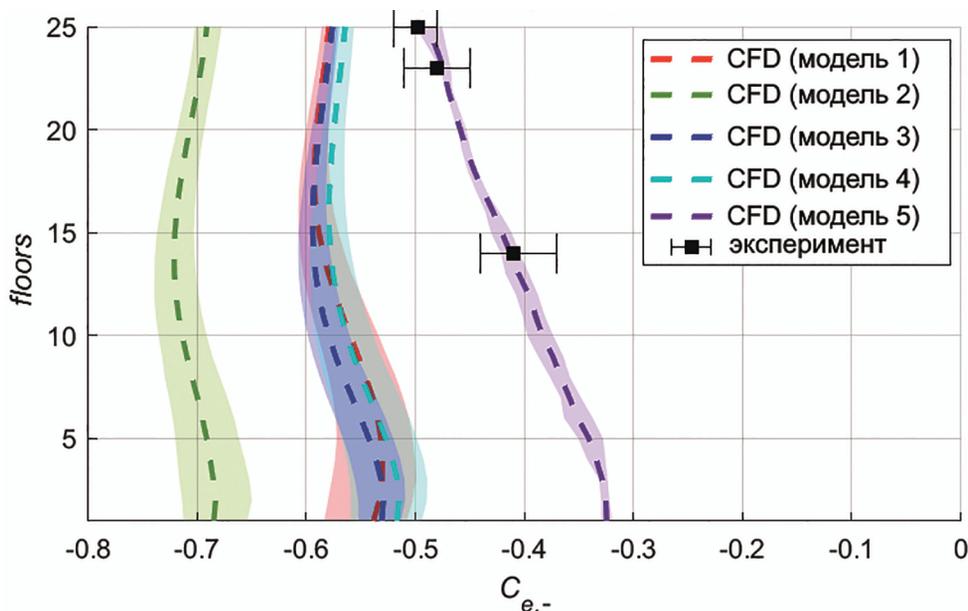


Рисунок А.3 – Пример сопоставления пиковых отрицательных аэродинамических коэффициентов $C_{e,-}$ вдоль вертикального сечения фасада 25-ти этажного здания

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, граничных условий, степени дискретизации, параметров численных схем и программного комплекса допускается не проводить новую валидацию.

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 крутильную жесткость 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:

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

где $\{\varphi\}_i$ – 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 $\{\varphi\}_i$, 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 $\{\varphi\}_i$ равнялась единице. В качестве метода решения обобщенной частной проблемы собственных значений рекомендуется блочный метод Ланцоша.

Б.3 Гармонический анализ

Б.3.1 В результате гармонического анализа определяются амплитуды напряженно-деформированного состояния. Гармонический анализ не учитывает нелинейные эффекты.

Б.3.2 Гармонический анализ следует проводить на основе метода конечных элементов в верифицированных промышленных программных комплексах.

Б.3.3 В гармоническом анализе следует учитывать значимые преднапряжения в конструкциях, например от вант.

Б.3.4 В качестве амплитуды ветровой нагрузки при вихревом возбуждении следует принять значение подъемной силы (см. 7.4.4), а в качестве частоты – частоту собственных колебаний, равную частоте срыва вихрей (см. 7.1.3).

Б.3.5 При расчете амплитуд напряженно-деформированного состояния следует учитывать конструкционное демпфирование. Значения коэффициента конструкционного демпфирования δ_s для основных типов конструкций приведены в таблице Б.1 (Eurocode EN 1991-1-4 [26]).

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)}	$H_b/L_b < 18$	0,020
	$20 \leq H_b/L_b \leq 24$	0,040
	$H_b/L_b \geq 26$	0,014
Стальные дымовые трубы с двумя и более обсадными трубами и с наружной теплоизоляцией ^{а)}	$H_b/L_b < 18$	0,020
	$20 \leq H_b/L_b \leq 24$	0,040
	$H_b/L_b \geq 26$	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/L_b допускается линейная интерполяция (H_b – характерная высота здания или сооружения, м; L_b – характерный размер здания или сооружения по нормали к направлению действия ветра, м)		

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 $M_{eff,i}$ преобладающих форм колебаний по направлению, соответствующей изгибной форме по направлению поперек потока:

$$m_{e,i} = \frac{M_{eff,i}}{l}. \quad (\text{Б.2})$$

где l – характерный размер конструкции, м.

Для высотных зданий и сооружений (башни, флагштоки и т.д.) в качестве характерного размера l принимается высота здания и сооружения, для мостовых конструкций - длина пролета, для иных конструкций - размер конструкции вдоль изгибных форм колебаний.

Б.4.2 Эффективные массы $M_{eff,i}$ определяются на основе модального анализа:

$$M_{eff,i} = \{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i. \quad (\text{Б.3})$$

Б.4.3 Для определения критической скорости возникновения галопирования достаточно определить эквивалентную погонную массу для первой изгибной собственной формы.

Б.5 Определение крутильной жесткости конструкции

Б.5.1 Крутильная жесткость GJ_t , необходимая для оценки критической скорости возникновения дивергенции, определяется на основе методов сопротивления материалов при действии сосредоточенного момента.

Б.5.2 Базовый угол поворота θ при заданном крутящем моменте относительно центральной продольной оси балки на уровне центра масс определяется:

$$\theta(x) = \frac{1}{GJ_t} \int_0^x M(\xi) d\xi. \quad (\text{Б.4})$$

Значение момента M выбирается произвольно и задается в виде пары сил.

Б.5.3 Крутильная жесткость GJ_t для центрального сечения определяется:

$$GJ_t = \frac{1}{2} \frac{\int_0^{l/2} M(x) dx}{\theta\left(\frac{b}{2}\right)}, \quad (\text{Б.5})$$

где l – длина вдоль продольной оси балки, b – длина поперек продольной оси балки.

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 [34-37].

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 [34] 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.

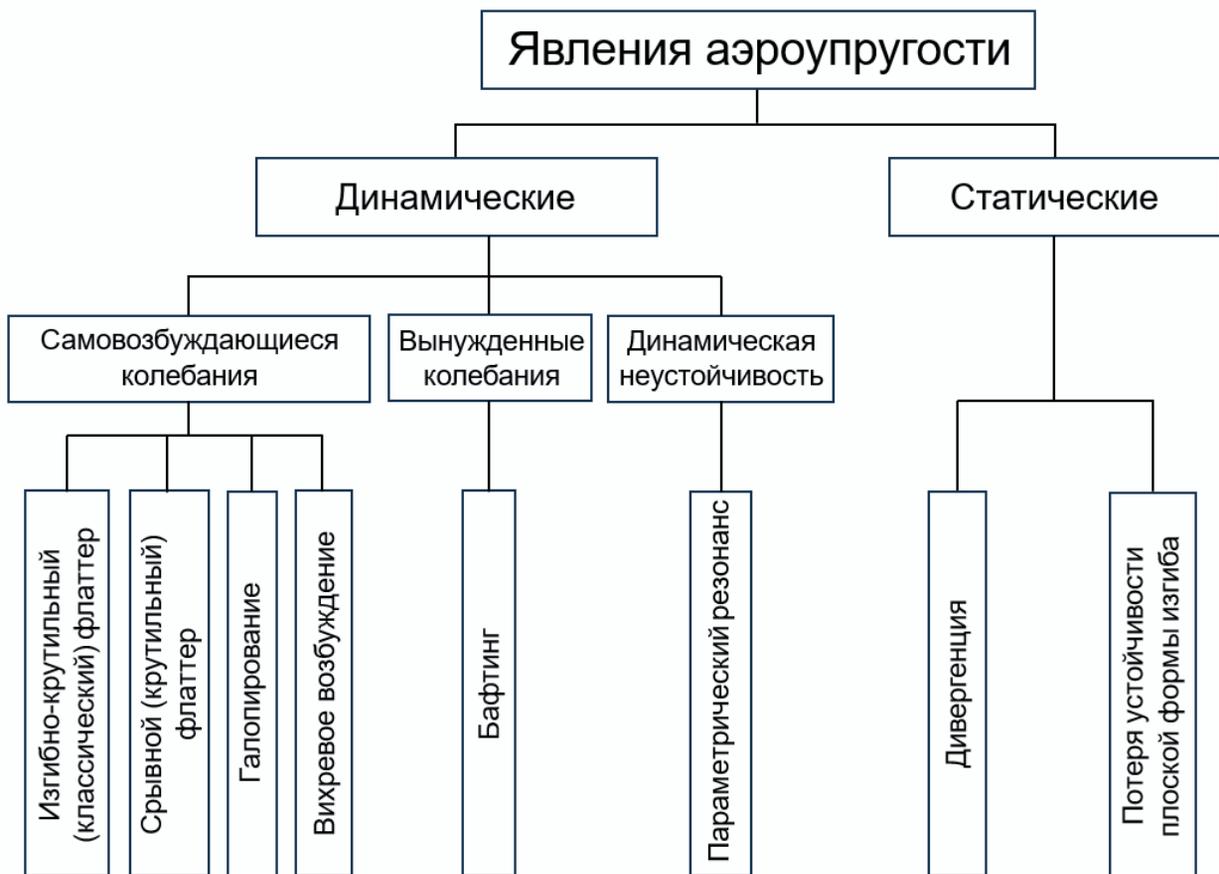
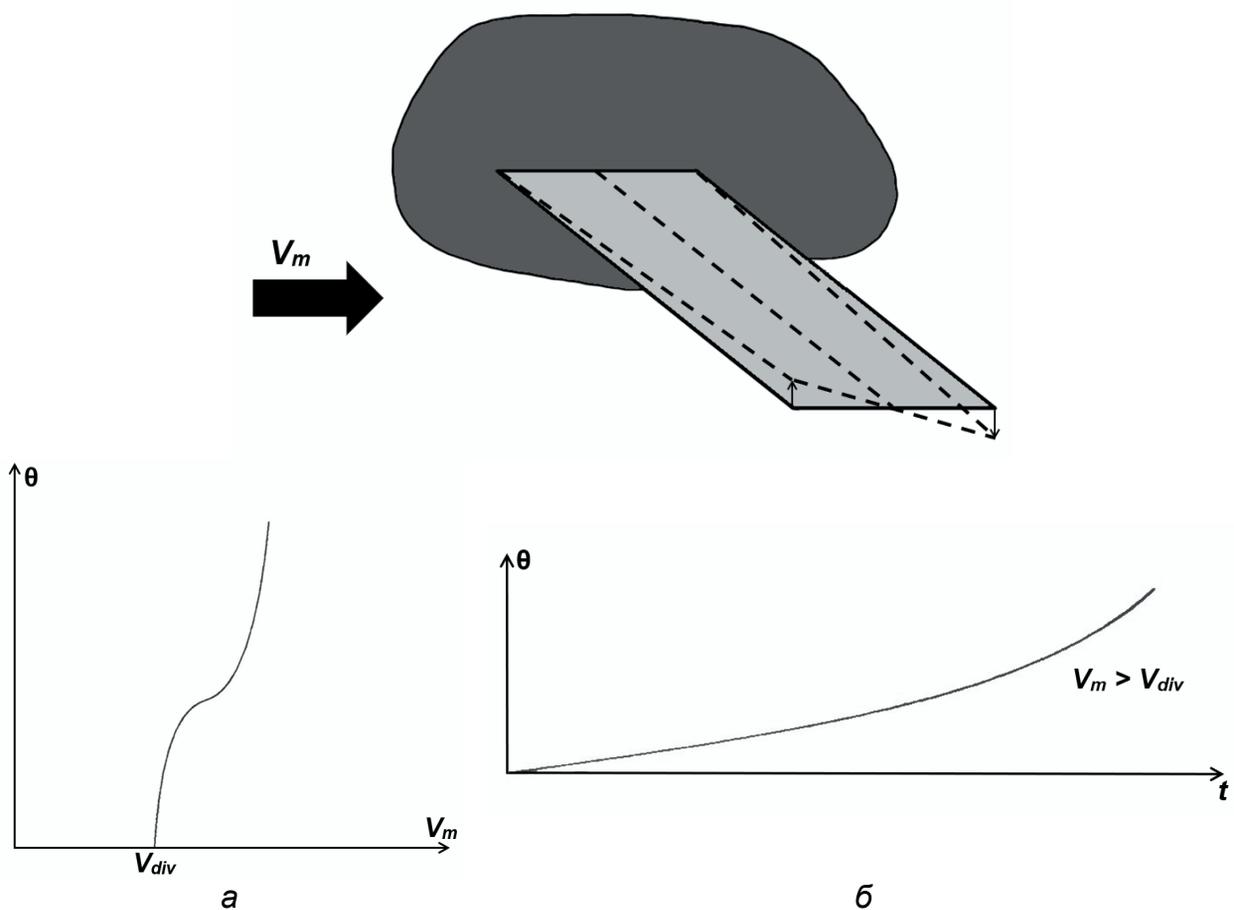


Рисунок В.1 – Классификация аэроупругих явлений

В.5 В зависимости от геометрических размеров поперечного сечения, механических параметров конструкции и ветровой нагрузки возможно возникновение *потери устойчивости плоской формы изгиба* в горизонтальном направлении – явление статической аэроупругой неустойчивости, возникающей при действии горизонтальной ветровой нагрузки.

В.6 Дивергенция – аэроупругие отклонения конструкции, возникающие в результате воздействия аэродинамического момента, который скручивает конструкцию, уравновешенную в общем случае упругим сопротивлением кручению (см. рисунок В.2). Данное явление также относится к статической аэроупругой неустойчивости. Возникновение дивергенции для конструкции опасно тем, что при так называемой критической скорости ветрового потока возрастающий аэродинамический момент не уравновешивается упругим сопротивлением конструкции кручению, что может привести к разрушению.

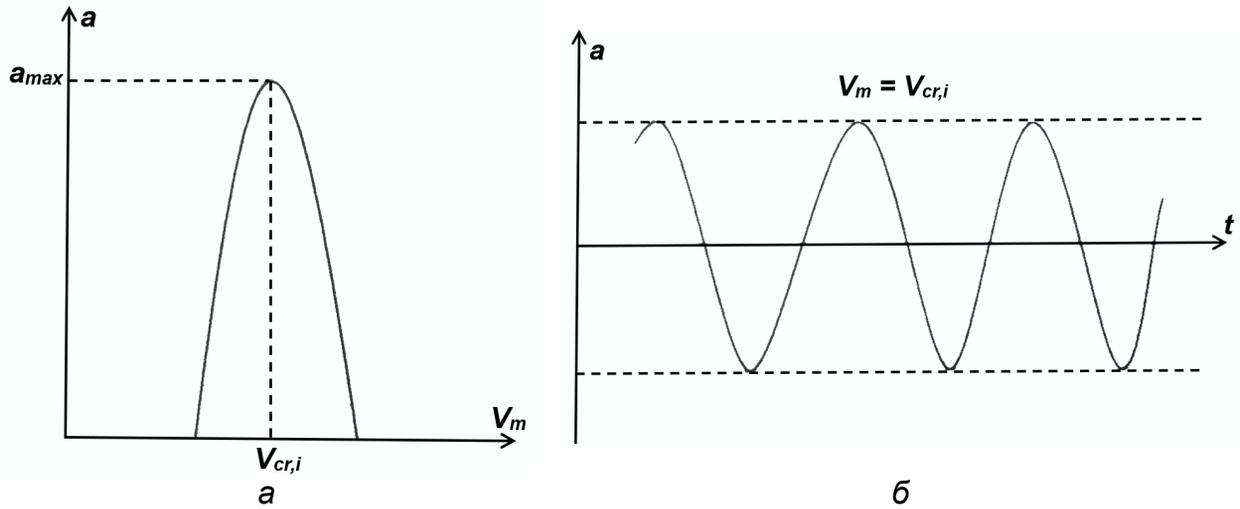
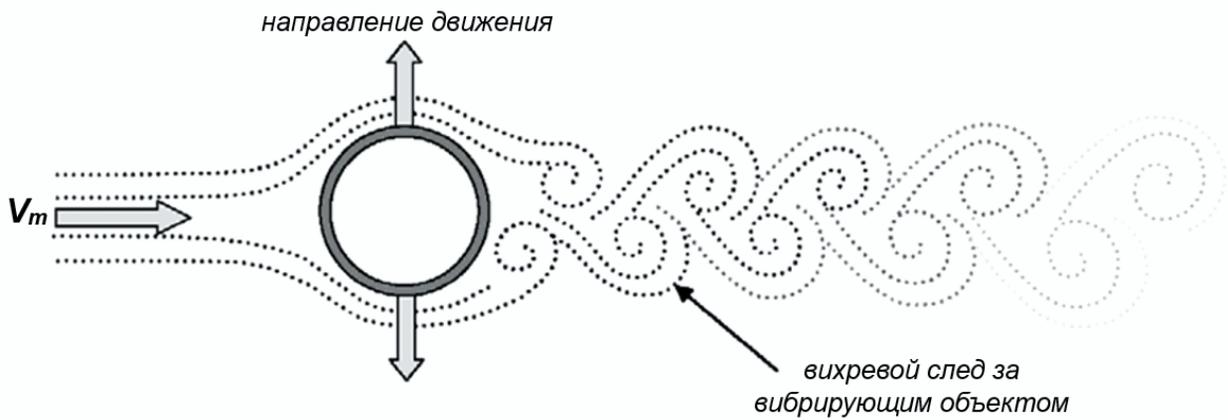


Характер изменения угла крутильных колебаний θ от:
 a – скорости ветра V_m ; b – времени t

(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.

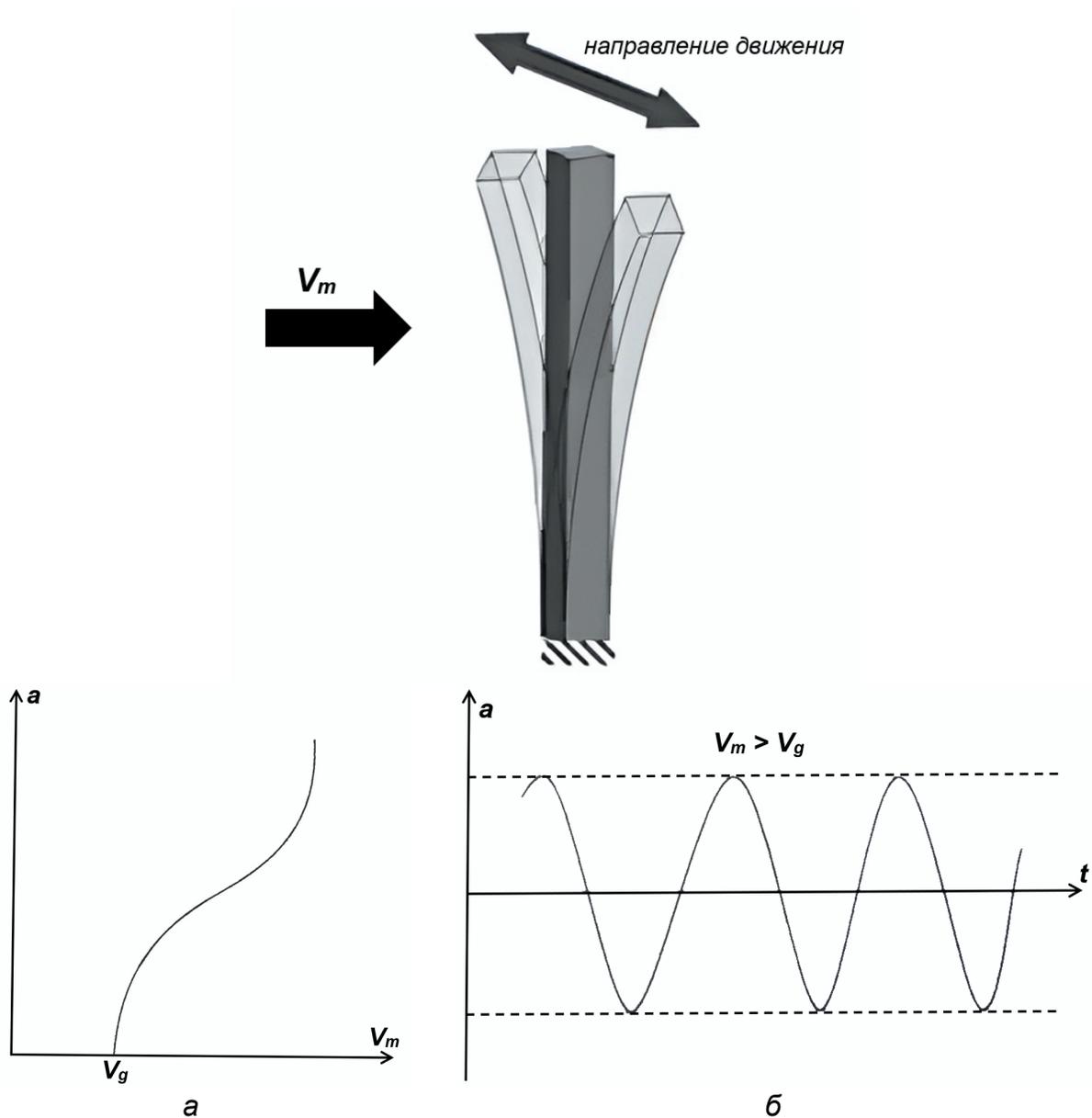


Характер изменения амплитуды колебаний a от:
 a – скорости ветра V_m ; $б$ – времени t

($V_{cr,i}$ – критическая скорость возникновения вихревого возбуждения для i -ой собственной частоты колебаний объекта)

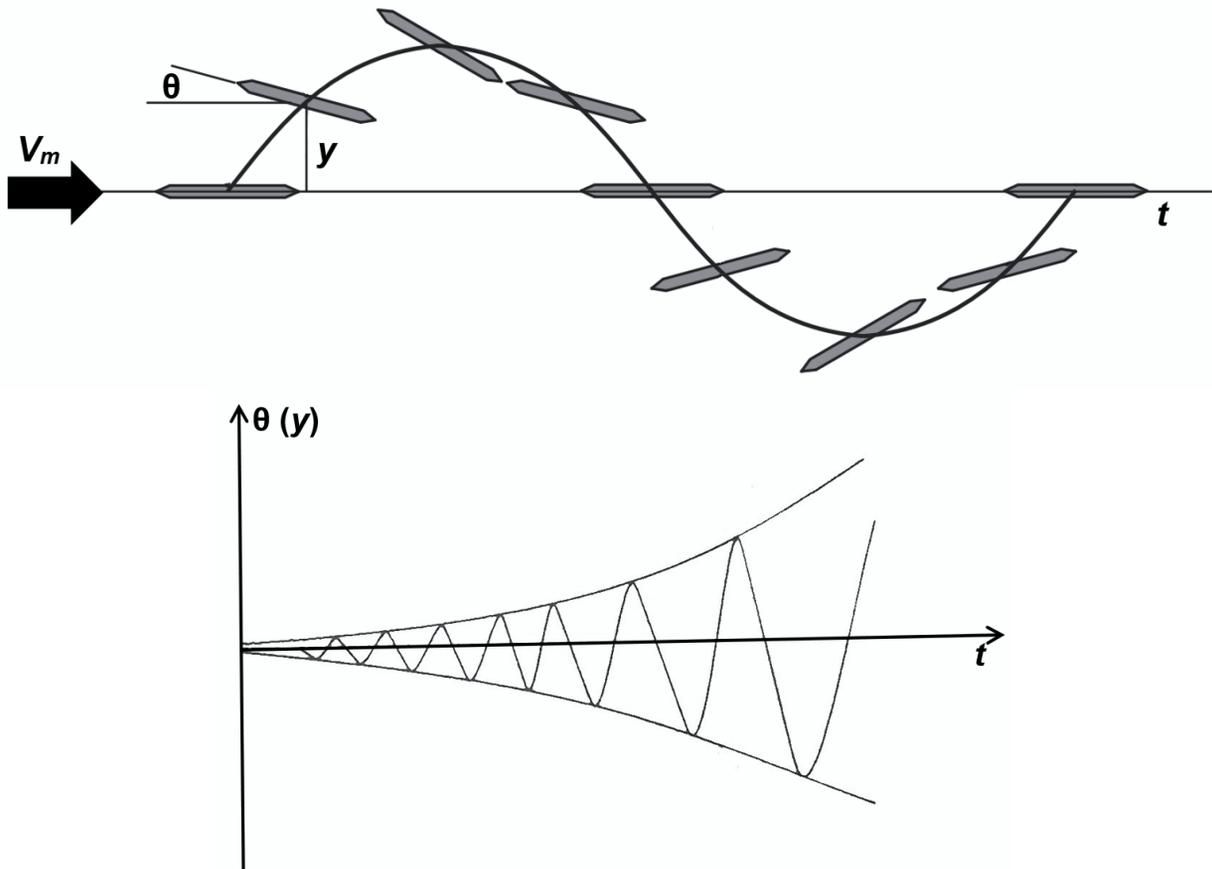
Рисунок В.3 – Пояснение характера проявления вихревого возбуждения

В.8 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. С увеличением скорости потока выше критического значения амплитуды таких колебаний нарастают в отличие от колебаний вихревого возбуждения (см. рисунок В.4).



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).



Характер изменения амплитуды колебаний от времени t
 ($V_{кр}$ – критическая скорость возникновения изгибно-крутильного флаттера)
 Рисунок В.5 – Пояснение характера проявления изгибно-крутильного флаттера

В.10 *Срывной флаттер* – аэроупругие автоколебания преимущественно крутильного вида и связанные с сильными аэродинамическими нелинейностями, срывом потока и образованием вихрей Кармана. К признакам срывного флаттера можно отнести:

- ограниченная амплитуда, зависящая от скорости потока, крутильной собственной частоты и демпфирующих свойств конструкций при крутильных деформациях;
- частота колебаний срывного флаттера близка к одной из собственных частот крутильных колебаний;
- доминирующие крутильные колебания;
- критическая скорость срывного флаттера, как правило, ниже критической скорости изгибно-крутильного.

В.11 *Параметрический резонанс (параметрические колебания)* – аэроупругие колебания конструкции, возникающие в результате периодического изменения параметров конструкции. Например, известно, что при кратности собственных частот вертикальных и горизонтальных (угловых) колебаний висячих мостов возникают параметрические колебания, аналогичные связанным колебаниям пружинного маятника (эффект качелей). Взаимное влияние этих колебаний состоит в том, что в процессе вертикальных колебаний периодически изменяется расстояние от центра изгиба поперечного сечения балки жесткости до 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 [26], CNR-DT 207/2018 [27]) 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 – 7.4. Для иных эффектов аэроупругости в нормативных документах не приводятся инженерных оценок.

Приложение Г (справочное)

Уравнения гидрогазодинамики

В записи формул настоящего раздела используется соглашение Эйнштейна – если в индексах одночлена одна и та же буква используется дважды, то по ней происходит суммирование. Например:

$$\sum_j a_{ij} b_j = a_{ij} b_j \text{ или } \sum_j \frac{\partial f_j}{\partial x_j} = \frac{\partial f_j}{\partial x_j}.$$

Г.1 Моделирование ветровых потоков и воздействий основано на численном решении системы трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики. В задачах строительной аэродинамики воздушная среда принимается несжимаемой (плотность $\rho = const$), изотермической, а внешние массовые силы не учитываются.

Г.2 Для ветровых потоков, указанных в Г.1, уравнения гидрогазодинамики имеют вид [38]:

- уравнения движения (Навье-Стокса):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}; \quad (\text{Г.1})$$

- уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (\text{Г.2})$$

где u_j – компоненты вектора скорости по осям x_j ;

p – давление;

t – время;

$\rho = \rho_a = 1,225 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха согласно ГОСТ 4401-81;

$\mu = \mu_a = 1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ – динамическая вязкость воздуха согласно ГОСТ 4401-81;

$\nu = \nu_a = \mu_a / \rho_a = 1,4607 \text{ м}^2/\text{с}$ – кинематическая вязкость воздуха согласно ГОСТ 4401-81.

Решением системы Г.1-Г.2 в общем случае является трехмерный нестационарный случайный процесс.

Г.3 Система уравнений для подхода RANS базируется на усреднении уравнений Г.1-Г.2 по времени и разложении искомых величин на среднюю и пульсационную составляющие:

$$\begin{aligned} u_j(\mathbf{x}, t) &= \bar{u}_j(\mathbf{x}) + u'_j(\mathbf{x}, t); \\ p(\mathbf{x}, t) &= \bar{p}(\mathbf{x}) + p'(\mathbf{x}, t); \\ \bar{u}_j(\mathbf{x}) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_j(\mathbf{x}, t) dt, \end{aligned} \quad (\text{Г.3})$$

где T – интервал усреднения.

В наиболее применимых RANS подходах принимается, что средние величины все же могут зависеть от времени, поэтому производная от времени сохраняется в уравнениях движения.

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. 4.2.3.1).

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 [39]:

- 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.

Система Г.8-Г.9 не замкнута из-за наличия неизвестных тензора остаточных напряжений и требуют дополнительных уравнений – подсеточных моделей турбулентности (см. 4.2.3.2).

При последовательном измельчении сетки уравнения LES стремятся к точным Г.1-Г.2, т.к. влияние подсеточных моделей турбулентности уменьшается с размером КО.

Решением уравнений LES в общем случае является случайный нестационарный трехмерный процесс.

Библиография

- [1] Tominaga, Y. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings / Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa, T. Shirasawa // *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. – 2008. – Vol. 96 – №. 10-11. – P. 1749-1761.
- [2] Menter, F.R. Best practice: generalized k- ω two-equation turbulence model in ANSYS CFD (GEKO) / F.R. Menter, R. Lechner, A. Matyushenko – ANSYS Germany GmbH, 2019.
- [3] Blocken, B. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems / B. Blocken, T. Stathopoulos, J. Carmeliet // *Atmospheric environment*. – 2007. – Vol. 4 – №. 2. – P. 238-252.
- [4] Волков, К. Н. Пристеночное моделирование в расчетах турбулентных течений на неструктурированных сетках / К. Н. Волков // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2007. – Т. 14 – №. 1. – С. 113-129.
- [5] Abu-Zidan, Y. Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings / Y. Abu-Zidan, P. Mendis, T. Gunawardena // *Heliyon*. – 2021. – Vol. 7 – №. 4.
- [6] Белостоцкий, А. М. Оценка пешеходной комфортности на основе численного моделирования ветровой аэродинамики зданий в окружающей застройке / А. М. Белостоцкий, И. Н. Афанасьева, И. Ю. Ланцова // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2019. – Т. 15 – №. 2. – С. 24-39.
- [7] Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment / J. Franke, A. Hellsten, H. Schlünzen, B. Carissimo. – Brussels, Belgium: COST Office, 2007. – 51 p.
- [8] Menter, F.R. Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD / F.R. Menter, R. Lechner, A. Matyushenko – ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2021.
- [9] Menter, F.R. Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD / F.R. Menter, R. Lechner, A. Matyushenko; Technical Report, Version 2.00 – ANSYS Germany GmbH, 2015.
- [10] Белостоцкий, А. М. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства / А. М. Белостоцкий, П. А. Акимов, И. Н. Афанасьева – 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. Ф. Барштейн; ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1978. – 224 с.
- [13] Попов, Н. А. Рекомендации по уточненному динамическому расчёту зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки: утв. Науч.-техн. Советом ЦНИИСК 15 дек. 1999 г. / Н. А. Попов; Госстрой России, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, ООО Еврософт. – М., 2000. – 46 с.
- [14] Горячевский, О. С. Численное моделирование ветровых давлений на окна. Валидация для типового многоэтажного здания квадратной формы / О. С. Горячевский // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2023. – Т. 19 – №. 3. – С. 114-129.

- [15] Бритиков, Н.А. Численное моделирование снеговых нагрузок на покрытия большепролетных зданий и сооружений : специальность 2.1.1. «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бритиков Никита Александрович ; Российский университет транспорта. – Москва, 2023. – 150 с.
- [16] Перельмутер, А.В. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / А.В. Перельмутер, В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, А.В. Махинько, В.А. Пашинский, С.Ф. Пичугин. – 4-е изд., перераб. – М.: Издательство СКАД СОФТ, издательство АСВ, издательство ДМК Пресс, 2014. – 596 с.
- [17] Bagnold, R.A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. / R.A. Bagnold //Methuen & Co.: William Morrow, New York. – 1941– 265 p.
- [18] Gromke, C. Snow particle characteristics in the saltation layer / C. Gromke, S. Horender, B. Walter, M. Lehning // Journal of Glaciology. – 2014. – Vol. 60 – №. 221. – P. 431-439.
- [19] Tominaga, Y. Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives / Y. Tominaga // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – Vol. 150. – P. 2-14.
- [20] Qiang, S. A novel snow transport model for analytically investigating effects of wind exposure on flat roof snow load due to saltation / S. Qiang, X. Zhou, M. Gu, L. Kang //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2021. – Vol. 210. – P. 104505.
- [21] Белостоцкий, А.М. Современные методы математического (численного) моделирования снегонакопления на покрытия сооружений произвольной формы. Критический обзор / А.М. Белостоцкий, Н.А. Бритиков, О.С. Горячевский // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Т. 17 – №. 4. – С. 40-59.
- [22] Белостоцкий, А.М. Методы физического моделирования снегонакопления на покрытиях сооружений произвольной формы. Критический обзор / А.М. Белостоцкий, Н.А. Бритиков, О.С. Горячевский // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Т. 17 – №. 4. – С. 22-39.
- [23] Naaim, M. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models / M. Naaim, F. Naaim-Bouvet, H. Martinez // Annals of Glaciology. – 1998. – Vol. 26. – P. 191-196.
- [24] Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads.
- [25] ASCE 7-22 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.
- [26] Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions –Wind actions.
- [27] CNR-DT 207/2008 Guidelines on Actions and Effects of Wind on Structures.
- [28] ASCE/SEI 49-21 Wind tunnel testing for buildings and other structures.
- [29] Белостоцкий, А.М. Оценка аэроупругой устойчивости шпиля башни / А.М. Белостоцкий, И.Ю. Негрозова, О.С. Горячевский //Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18 – №. 11. – С. 1745-1762.
- [30] Yeo, D. A Summary of Industrial Verification, Validation, and Uncertainty Quantification Procedures in Computational Fluid Dynamics / DongHun Yeo – US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2020. – 26 p.
- [31] Stern, F. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations – Part 1: methodology and procedures / F. Stern, R.V. Wilson, H.W.

- Coleman, E.G. Paterson // *Journal of Fluid Engineering*. – 2001. – Vol. 123 – №. 4. – P. 793-802.
- [32] Stern, F. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations – Part 2: Application for RANS simulation of a cargo/container ship / F. Stern, R.V. Wilson, H.W. Coleman, E.G. Paterson // *Journal of Fluid Engineering*. – 2001. – Vol. 123 – №. 4. – P. 803-810.
- [33] Coleman, H. W. Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers / H. W. Coleman, W. G. Steele – John Wiley & Sons, New York, 1999 – 275 p.
- [34] Казакевич М. И. Аэродинамика мостов / М. И. Казакевич – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.
- [35] Ланцова, И.Ю. Моделирование аэродинамической неустойчивости строительных конструкций на примере сечения моста. Часть 1: оценка аэродинамической неустойчивости сечения инженерными методами / И.Ю. Ланцова, И.Н. Афанасьева // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2018. – Т. 14 – №. 1. – С. 102-112.
- [36] Белостоцкий, А.М. Моделирование аэродинамической неустойчивости строительных конструкций на примере сечения моста. Часть 2: Решение задачи в связанной аэроупругой постановке и сопоставление с инженерными оценками / А.М. Белостоцкий, И.Н. Афанасьева, И.Ю. Негрозова, О.С. Горячевский // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2021. – Т. 17 – №. 3. – С. 24-38.
- [37] Негрозова, И. Ю., Афанасьева И. Н. Обзор аналитических и полуэмпирических подходов для анализа аэродинамической неустойчивости типа флаттер / И.Ю. Негрозова, И.Н. Афанасьева // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. – 2023. – № 1 (54). – С. 119-140.
- [38] Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: учебное пособие: для вузов. В 10 томах. Том VI. Гидродинамика. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц; 6-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 728 с.
- [39] Волков, К.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 364 с.