

Отзыв на
СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ
«ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ И СНЕГОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ»
„NUMERICAL MODELLING OF WIND AND SNOW ACTIONS”

Общая характеристика

Рекомендации и требования, изложенные в СТО, представляют собой информацию для стандартизации процедуры численного моделирования ветровых и снеговых воздействий с использованием современных программных комплексов, учитывая при этом данные существующих аналитических подходов, физического моделирования и строительных стандартов. СТО включает в себя разделы по моделированию ветровых нагрузок, снеговых нагрузок, аэроупругих эффектов, а также рекомендации и требования к проведению комплексных оценок, основанных на сочетании численного и физического моделирования. Особое внимание в документе уделено оценке результатов численного моделирования и приведении их интерпретации в соответствие с имеющимися стандартами и нормами строительной отрасли.

Достоверность приведенных в СТО сведений не вызывает сомнений, что подтверждается: научно-исследовательскими работами авторов, получившими положительную оценку научного сообщества (диссертации И.Н. Афанасьевой, Н.А. Бритикова, статьи авторов в рецензируемых отечественных и зарубежных авторов, монографии авторов); обширным и впечатляющим опытом коллектива авторов в части решения прикладных и промышленных задач строительства. Также Стандарт разработан с учетом методик и исследований, опубликованных в открытом доступе в научной литературе; данных отечественных строительных и зарубежных стандартов и действующих норм. Рекомендации и требования, изложенные в Стандарте организации, написаны ясным, литературным языком, имеют однозначную интерпретацию, хорошо аргументированы и подтверждены соответствующими ссылками на литературу.

Замечания, рекомендации и вопросы по тексту изложены ниже:

Замечания и рекомендации

1. Раздел 3 «Термины, определения, обозначения и сокращения». На стр. 1 - 3 приводятся термины и определения, которые в дальнейшем используются в стандарте. В частности, даны определения:

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

В части терминологии моделей турбулентности в литературе обычно присутствует вариативность. Но, по моему впечатлению, чаще используется обобщенное, широкое определение «модель турбулентности», которое включает в себя не только RANS, но и DES, LES и даже DNS. Например, в классификации (P.A. Durbin, T.I-P. Shih, 2005). Возможно, следует расширить понятие «модель турбулентности» и включить туда все существующие сегодня подходы.

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

Более корректный термин - подсеточная модель турбулентности. «Подсеточная турбулентность» используется в литературе намного реже: турбулентность - это физическое явление, а сетки относятся к моделям.

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

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

Эти два определения друг друга дублируют. Если подставить определение: *аэроупругие явления* – проявления взаимного влияния ветрового потока и перемещений конструкции, смысл не изменится.

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

Не понятно, что подразумевается под «начальной осью». Возможно, лучше использовать «условной осью». Возможно, имеет смысл ввести более общее, географическое определение «направления ветра».

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

Термин «угол атаки» встречается чаще. Если использовать его по аналогии с терминологией в авиастроении, то «угол атаки ветра» звучит не совсем корректно. Обычно используется просто «угол атаки». Понятие «начальной оси» здесь также требует уточнения. Важно, как мне кажется, уточнить, что «ось» (характерное направление) должна быть связана с обтекаемым объектом.

2. Раздел 3 «Термины, определения, обозначения и сокращения». На стр. 3 - 5 приводятся обозначения, которые в дальнейшем используются в стандарте:

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

Возможно, стоит уточнить, что подразумевается под концентрацией снега, так как это не общеупотребительный термин, например, как плотность снега, толщина/высота снежного покрова и т.д.

ΔP – смещенное статическое давление, соответствующее натурным условиям несесненного потока, Па;

Не совсем понятно, что означает «смещенное» статическое давление. Далее, в п. 5.2.4 даны пояснения: $\Delta P = P - P_{ref}$. Можно ли использовать термин «относительное»?

V_m – средняя скорость потока, м/с;

Можно было бы добавить «Средняя скорость потока ветра» или, лучше, «Средняя скорость ветра».

q_+ – поток отложения, кг/м²с; q_- – поток уноса, кг/м²с;

Здесь хотелось бы уточнить, речь идет о потоке отложения/уноса снега?

u_{\square} – скорость трения, м/с; u_t – скорость трения, м/с;

Одна величина имеет двойное обозначение.

ψ_{OQ} – метрика ортогонального качества конечного объема;

Возможно, корректнее «метрика качества ортогональности конечного объема».

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

Более распространено: Осредненные по Рейнольдсу.

3. Раздел 4.1 «Моделирование турбулентных потоков» на стр. 6.-7:

4.1.3.2 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

Почему в качестве рекомендаций выбрана подсеточная модель WALE? Проводились ли валидационные тесты или, может быть, указать ссылку на работы, где исследовался этот вопрос?

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

Не понятна формулировка этого пункта. В целом, DES – это обобщенное название гибридного RANS-LES подхода, есть множество модификаций. Нужны пояснения, что подразумевается под «устаревшей моделью DES», которую недопустимо использовать.

Пояснения к формуле (4.1): u_t – скорость трения

Обычно используется термин «динамическая скорость» (см. https://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/turb_models/Term8_Lec08_near_wall.pdf).

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

Комментарий: В публикации (Computer Research and Modeling, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 1221–1239 (Russian)) разработчики Flowvision показали результаты расчетов по модифицированным пристеночным функциям, которые применимы до значений $y^+ \sim 4$. В различном софте реализованы различные типы функций, а, следовательно, могут меняться и рекомендации по y^+ . Важный вопрос при подготовке стандарта, с моей точки зрения, — как сформулировать рекомендации таким образом, чтобы они работали независимо от типа ПО (ANSYS, Flowvision и др.). Возможно, нужны какие-то пояснения, что для стандартных пристеночных функций выполняются описанные выше базовые требования, однако в зависимости от реализации алгоритмов в ПО могут встречаться модификации функций, для которых требуется уточнение области их применимости.

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

В данной части просится добавить уточнение о соблюдении критериев подобия при проведении исследования в уменьшенном масштабе. Возможно, это может быть вынесено в отдельный пункт рекомендаций.

4. Раздел 4.2 «Граничные и начальные условия» на стр. 7-8:

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

Хорошо было бы уточнить критерии детализации относительно мелких элементов. Ввести пояснения, какие элементы необходимо учитывать через эквивалентную шероховатость/функции стенки, а в каких случаях элементы можно игнорировать.

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

Возможно, следует также уточнить, что следует выбирать в качестве начальных условий для стационарных расчетов.

5. На стр. 7-11 приведены два раздела рекомендаций: 4.2 «Граничные и начальные условия» и 4.3 «Детализация и форма расчетной области».

В разделе 4.2. есть подпункты 4.2.3, 4.2.5, 4.2.7, 4.2.9, 4.2.10, которые относятся, по моему мнению, не к граничным условиям, а к характеристикам расчетной области. В этих пунктах также используются термины «вход» потока, «выход» потока, которые не определены ранее и при этом являются больше «сленговыми» для расчетчиков, что затрудняет понимание. Например, что будет «входом потока» в цилиндрической области? В связи с этим, в качестве рекомендации, можно предложить:

- поменять местами разделы 4.2 и 4.3. Тогда сначала, в п. «Детализация и форма расчетной области» будет введена более строгая терминология (и пояснения на рисунках), какие бывают формы расчетной области, что будет считаться входной/выходной/верхней/нижней/боковой границами расчетной области, какие рекомендации стоит соблюдать при выборе размеров области, если это цилиндр или параллелепипед. Затем, в разделе «Граничные и начальные условия» будет легче описать ГУ и НУ с учетом терминологии из предыдущего пункта.

6. Стр. 9-11, рекомендации по детализации строительных объектов:

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

Возможно, следует конкретизировать данный пункт. В моем представлении, наоборот, пространственная дискретизация расчетной области должна быть выбрана исходя из геометрии сооружений. Кроме того, что будет считаться размером конечных объемов на данном этапе (этапе детализации геометрии зданий), некая предварительно заданная величина? Ведь, как правило, размер конечного объема варьируется на неструктурированных сетках.

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

Возможно, было бы интересно ввести некоторую стандартизацию в вопросе детализации геометрии. Может ли быть использована классификация моделей по уровню детализации LOD (Level of detailisation)? Например, уровень LOD1 для объектов, расположенных удаленно относительно окружающей застройки. LOD1+кровля для ближайшей окружающей застройки.

Рисунок 4.1 – Примеры расчетных областей, б) цилиндрическая расчетная область для сложного рельефа (без исследуемых зданий)

Было бы хорошо обозначить на рисунке раздел границ «вход»- «выход» по аналогии с рисунком 4.1, а.

7. Стр. 11-13, рекомендации по пространственной и временной дискретизации численных моделей:

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

Вызывает вопросы переходная зона от гексаэдральных к полиэдральным элементам. Зона перехода находится вблизи/в погранслое, при этом видно, что в зоне перехода есть «клиновые» элементы низкого качества. Не могу утверждать, что данная сетка не применима, но не замечалось ли артефактов в решении при таких переходах?

Возможно, в раздел стоит также добавить пункт о рекомендациях к выбору формы КО.

8. Стр. 14, требования к численным схемам:

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

4.5.3 В гибридном RANS-LES подходе следует использовать центральную или ограниченную центральную разность по пространству для уравнения моментов, схему 1-го порядка по пространству для уравнений переноса турбулентных характеристик и ограниченную неявную схему по времени [9].

Возможно, вместо «следует использовать центральную или ограниченную центральную разность по пространству» лучше использовать более широко употребительный термин «следует использовать центральную или ограниченную центральную разностную схему аппроксимации по пространству»

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

В работе [8], Menter F. R., Lechner R., Matyushenko A. Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD // ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA. – 2021, некоторые

рекомендации к численным схемам приведены на стр. 68, п. 5. Numerical Settings. Однако, это лишь общие, универсальные рекомендации, которые были даны для очень широкого спектра задач при расчетах в пакете ANSYS в стационарной постановке. Затрудняюсь ответить, насколько оправданно такое требование в рекомендациях к расчету ветровых нагрузок. Кроме того, наименование метода Coupled, насколько я помню, используется именно в продуктах Ansys. Возможно, стоит выбрать такую формулировку, чтобы она давала прозрачные рекомендации по выбору численной схемы, независимо от используемого программного продукта. Например, «При использовании RANS подхода в стационарной постановке рекомендуется использовать связанные алгоритмы расчета скоростей и давления, основанные на неявной связи уравнения сохранения импульса и неразрывности, например, метод Coupled в [8]».

В п. 4.5.5. также говорится про метод Coupled как более устойчивый и ресурсозатратный. Если ввести пояснения в разделе 4.5.4, то в п. 4.5.5. детальные пояснения метода уже не требуются.

9. На стр. 15-16 в разделе 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....Информация об используемых функциях стенки должна быть приведена в документации соответствующего программного комплекса....

Ранее в тексте использовалось понятие «пристеночной функции». Возможно, стоит использовать единую терминологию.

5.1.5. ... – расстояние должно быть минимальным из условия отсутствия градиентов давления, обусловленных обтеканием зданий...

Сформулировано не очень понятно. Хотелось бы пояснения, что имеется в виду. Как я понимаю, имеется в виду поиск такой точки вверх по потоку, которая расположена максимально близко к застройке, но при этом находится в зоне невозмущенного препятствиями потока?

10. На стр. 26-28, раздел 6.2 «Численное моделирование снегонакопления и снеготранспорта»:

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

Исходя из размерности, не очень понятно, какой физический смысл имеет данный коэффициент и как его определить экспериментально?

В случае отсутствия экспериментальных данных для исследуемого объекта следует использовать следующие значения констант модели: $\rho_s = 300 \text{ кг/м}^3$, $C = 5 \text{ г/м}^3$, $w_f = 0.5 \text{ м/с}$, $A_{ra} = 10^{-4} \text{ кг с/м}^4$

В рекомендациях дана ссылка на статью: *Подробное обоснование представленной методики приведено в (Бритиков, Н.А. Методика численного моделирования снеготранспорта и снеготранспорта на покрытиях большепролетных зданий и сооружений в стационарной и нестационарной постановках // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – Т. 18. – №. 4. – С. 23-38.)* К сожалению, в статье не приведены сведения, каким образом были получены коэффициенты модели, только приведены их значения и сказано, что они получены экспериментально. Было бы более информативно, если бы была предоставлена ссылка на эти данные.

Кроме того, в статье [20] указано:

In conclusion, the advantage of the steady-state approach over the transient approach is demonstrated, but the modelling results still cannot be used directly for the design shape coefficient. It should be also noted that the absolute height of the snow surface depends on the observing time periods Δt and Δx and can be adjusted, but the pattern of the snow accumulation and snow transport itself remains unchanged and depends entirely on the shear stress pattern on the roof.

и

Unsolved problems remain that the methodologies do not consider. For example, at current time they don't account for snowmelt, the impact of which may be detrimental for many roofs and buildings, specifically for translucent constructions. We believe that the methodology may and will be expanded to take other snow accumulation phenomena into consideration and thus allow to obtain higher-quality results and further secure the mechanical safety of buildings.

Возможно, имеет смысл указать ссылку не на статью, а на диссертационное исследование Н.А. Бритикова, что позволит получить большее представление об обоснованности методики.

11. На стр. 33-40, раздел 7 «Методики оценок аэроупругих эффектов»:

стр 33: 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

Возможно, будут полезны уточнения, как выбирается угол атаки 0° в случае существенно неоднородного рельефа местности?

стр. 38: 7.5.1 Оценки по методикам, представленным в 7.2 – 0, являются предварительными.

Нарушена ссылка на обозначения формул.

Стр. 39 На основе новых координат узлов обновляется КО-сетка и решается задача аэродинамики.

Возможно, здесь можно уточнить, что на основе новых координат узлов, вычисляется новое расположение границы CFD области и, при наличии изменений расположения границы, производится перестроение/обновление КО-сетки.

Стр. 38-39. раздел 7.5 Прямое связанное моделирование аэроупругих явлений

Раздел выглядит немного неполным по сравнению с рекомендациями, данными для расчета аэродинамических и снеговых нагрузок. Например, было бы очень полезно добавить рекомендации по выбору шага по времени для связанных расчетов, минимальному количеству итераций на каждом шаге по времени, а также по методам перестроения сетки вблизи интерфейсной границы.

12. На стр. 40-42, раздел 8 «Требования и возможности»:

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

Физическое моделирование, в большинстве случаев, проводится в уменьшенном масштабе. Численное моделирование может проводиться в масштабе 1:1. Должна ли производиться оценка критериев подобия моделей в случае определения снеговых нагрузок?

Также в данном разделе не увидела рекомендаций по оценке критериев подобия при определении аэродинамических нагрузок.

Отзыв составлен:

К.ф.-м.н. С.А. Вальгер



Место работы и должность:

научный сотрудник,

Факультет геодезии, компьютерных наук и математики,

Штутгартская высшая техническая школа,

г. Штутгарт, Германия