

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКИ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

*Е. В. Матвеевко*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ст. преподаватель кафедры архитектуры УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь

### Реферат

Метод вычислительной гидродинамики для анализа распределения снега и образования сугробов начал применяться в 1990-х годах. Однако трудоемкость данного метода за последние 30 лет позволила выработать и верифицировать модели только для конкретных явлений и ситуаций. В данной статье рассмотрены наиболее значимые результаты в области применения методов вычислительной гидродинамики, проанализированы недостатки и ограничения.

**Ключевые слова:** снеговая нагрузка, моделирование, распределение, гидродинамика

### MODELING THE SNOW LOAD DISTRIBUTION BY METHODS OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

*E. V. Matsveyenko*

### Abstract

The method of computational fluid dynamics to analyze the distribution of snow and the formation of snowdrifts began to be applied in the 1990s. However, the complexity of this method over the past 30 years has allowed to develop and verify models only for specific phenomena and situations. This article considers the most significant results in the field of application of computational fluid dynamics methods, analyzes the disadvantages and limitations.

**Keywords:** Snow load, simulation, distribution, hydrodynamics.

### Введение

При совместном воздействии снегопада и ветра на зданиях и вокруг них образуются снежные сугробы. Снег, который сдувается с наветренной стороны препятствия набегающим потоком, накапливается на подветренной стороне, где скорость ветра ниже, оседает и дрейфует. Поэтому образование сугробов – процесс сложного взаимодействия между движущимися снежными частицами и потоком воздуха, деформированного геометрией здания. Образование сугробов приводит к чрезмерному скоплению снега и неравномерным нагрузкам и на крышах зданий. Сугробы вокруг зданий могут создавать трудности для движения пешеходов и транспорта, а также создавать сложности при уборке снега. Таким образом, для решения задач, связанных с распределением снега на застроенных территориях, необходимо с достаточной точностью прогнозировать его качественное распределение на крышах зданий и вокруг них.

В целом перенос снега под воздействием ветра подразделяется на три процесса: ползучесть, солевание и суспензия [1, 2]. Ползучесть – явление, при котором снежинки перемещаются путем ползучести или скольжения по поверхности на высоте до 0,01 м. Солевание (оседание) – это процесс, при котором снежинки перемещаются при помощи повторного прыжка после столкновения с поверхностью. Высота оседания снежинок составляет 0,01–0,1 м. Суспензия (взвесь) – это процесс, при котором снежинки подхватываются вверх турбулентными вихрями и переносятся на значительные расстояния. Суспензия происходит на высоте 0,1–100 м. Данные процессы снегопереноса в пограничном слое исследовались в основном для плоской местности [3, 4]. Однако вокруг препятствий (таких как здания, заборы, волнообразный рельеф) эти процессы сильно усложняются из-за деформации воздушного потока.

Для исследования таких сложных явлений наиболее подходящими являются полномасштабные и уменьшенные масштабные измерения ветрового поля. Надежность данных методов обеспечивается тем, что в них применяются реальные потоки, реальные частицы в реальных средах [5]. Однако при полевых испытаниях граничные условия не контролируются, поэтому применимость полномасштабных измерений для систематических и параметрических исследований весьма ограничена. Для компенсации этих ограничений в течение многих лет проводились экспериментальные исследования с использованием аэродинамических труб и водных лотков. Преимуществами таких методов является то, что такие условия, как скорость и направление ветра, а также характеристики частиц, являются контролируемыми параметрами. Значительные

успехи в физическом моделировании ветра и движения частиц снега были сделаны в 1950–1970-х годах и были признаны прикладными инструментами для практического прогнозирования снежных сугробов вокруг препятствий (зданий, ограждений, насыпей и т. д.) [6–11]. Однако аэродинамические трубы и водные лотки не всегда доступны либо очень дороги, такие испытания трудоемки и требуют много времени. Кроме того, данные методы имеют ряд ограничений для обеспечения гидродинамического подобия. Поэтому в разные времена для имитации частиц снега применялись активированные глины, стеклянные шарики, опилки, измельченная ореховая скорлупа [1, 3, 8, 12].

В последнее десятилетие произошло резкое увеличение вычислительной мощности компьютеров, а также развитие компьютерного программного обеспечения для математического моделирования процессов механики жидкостей и газов. Это значительно расширило возможности исследователей при решении инженерных задач. В области исследований потока жидкостей и газов развивается метод вычислительной гидродинамики – CFD (от англ. Control Fluid Dynamic). Метод вычислительной гидродинамики имеет преимущество перед экспериментальными методами моделирования в том, что все параметры модели являются контролируемыми без ограничений подобия [13]. Метод вычислительной гидродинамики начал развиваться в 1980-х годах для исследований ветроэнергетики, имел успешный опыт применения и в 1990-х был выделен как отдельный метод для различных областей исследования. Применение метода вычислительной гидродинамики к анализу распределения снега и образованию сугробов началось в 1990-х годах.

### 1. Анализ практического опыта численного моделирования снегопереноса методами вычислительной гидродинамики

В таблице 1 перечислены модели турбулентного потока и способы их верификации при численном моделировании сугробов вокруг зданий, применяемые с 1991 по 2016 годы.

В 1990-х годах возросла роль вычислительной гидродинамики при исследовании проблем ветроэнергетики, а затем этот метод начал применяться к различным экологическим проблемам, в том числе и к образованию снежных сугробов [14, 15]. В первых исследованиях в 1991 году образования снежных сугробов с использованием метода вычислительной гидродинамики применялся подход, в котором поле скоростей ветра определялось моделью турбулентного потока, эффект взвешивания моделировался уравнением массопереноса, эффект оседания – как функция от пороговой скорости

Таблица 1 – Модели снеготранспорта в методах вычислительной гидродинамики

Год	Вид модели	Модель турбулентного потока	Верификация
1991 [16]	3D	Модель Буссинеска (0 уравнений)	натурные наблюдения
1993 [17]	2D/преграда	Стандартная $K-\epsilon$	нет
1994 [18]	3D/здания	Стандартная $K-\epsilon$	натурные наблюдения
1994 [19]	3D/здание	Модель Буссинеска (0 уравнений)	натурные наблюдения
1998 [20]	2D/сечение здания	Модель Спаларта-Альмараса ( $k$ )	нет
1998 [4]	2D/преграда	Модифицированная $K-\epsilon$	аэродинамическая труба
1999 [21]	3D/реальное здание	Модифицированная $K-\epsilon$	нет
2004 [22]	3D/отдельный куб	Стандартная $K-\epsilon$	натурные наблюдения
2008 [23]	3D/здания	Стандартная $K-\epsilon$	натурные наблюдения
2011 [24]	3D/модель здания	Модифицированная $K-\epsilon$	натурные наблюдения
2015 [25]	2D/driftng snow boundary layer	Модифицированная $K-\epsilon$	натурные наблюдения
2016 [26]	3D/модель здание	Модифицированная $K-\epsilon$	аэродинамическая труба

ветра (скорость, при которой начинается перенос снега, зависит силы трения) [16]. Этот подход также использовался в качестве базовой модели во многих других исследованиях. Пример результата, полученного с использованием этого подхода, показан на рисунке 1.

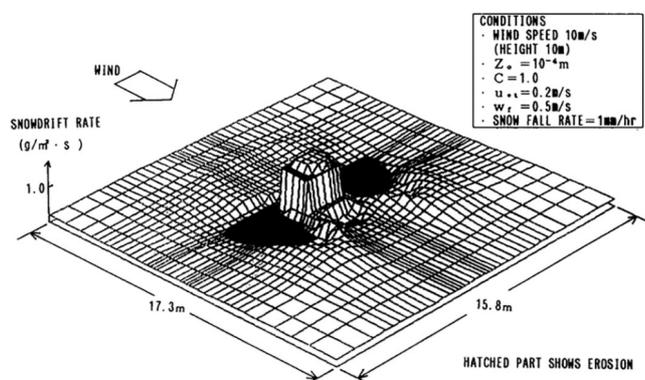
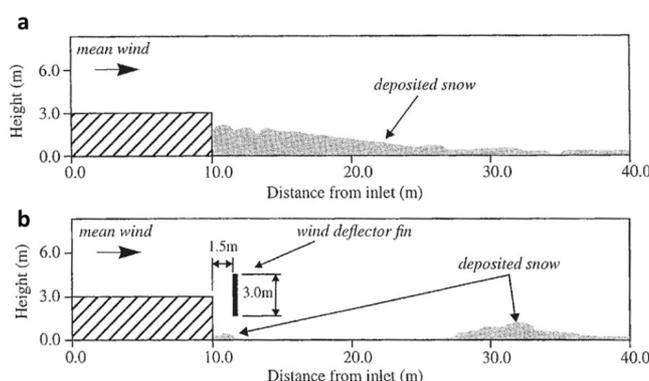


Рисунок 1 – Трехмерное распределение снежных сугробов с применением метода вычислительной гидродинамики, впервые полученное в 1991 г. [16]

Вскоре после этого в 1993 г. предпринимались попытки анализировать распределение снега вокруг двумерного вертикального ограждения используя стандартную  $K-\epsilon$ -модель турбулентного потока [17]. В 1994 г. была предложена модель сугробов двухфазного потока, называемая «обобщенной моделью дрейфового потока». Данная модель применялась для анализа осадения снега в трехмерном пространстве вокруг группы зданий, однако она не учитывала процесс оседания [18]. В том же году была предложена численная модель, которая описывала образование профилей снеговых сугробов вблизи конкретных зданий в течение заданного изменения во времени скорости и направления ветра. Данная модель применялась для прогнозирования сугробов вокруг исследовательских зданий в Антарктике, и результаты сопоставлены с экспериментальными данными полевых наблюдений. В 1998 г. был использован метод «объема среды» для создания переходной модели развития сугроба и численного исследования двумерного сугроба с подветренной стороны здания на плоской местности с использованием односторонне связанной модели (поток воздуха контролировал снеготранспорт в рамках эйлеровых скоростей). На рисунке 2 показаны результаты численного прогнозирования накопления снега с подветренной стороны здания при наличии экрана для отклонения ветра и без него. Эффект наличия экрана для отклонения ветра был четко продемонстрирован [18].

Также в 1998 г. была разработана модель эрозионного накопления, в которой массовый обмен определялся по отношению к турбулентности потока, пороговой скорости и концентрации снега. Данная модель предполагала введение дополнительных уравнений в стандартную  $K-\epsilon$  модель турбулентного потока, чтобы учесть влияние частиц снега на турбулентность [4]. Эта модель часто применяется в последующих исследованиях.



а) при отсутствии экрана, отклоняющего ветер, б) при наличии экрана, отклоняющего ветер [20]

Рисунок 2 – Численное моделирование процесса накопления снега с подветренной стороны здания

Также были предложены другие различные подходы. Например, метод Лагранжа для анализа поведения снежных частиц в снеготранспорте вокруг двумерного здания [27].

Несмотря на то, что в 1990-х годах применимость моделей турбулентности к обтеканию сложных тел, таких как здание, изучалась широко, результаты этих исследований указывают на недостатки, присутствующие в стандартной модели  $K-\epsilon$ , которая широко используется для инженерных расчетов различных потоков. Важным недостатком стандартной модели  $K-\epsilon$  является то, что она не может правильно воспроизводить потоки разделения вокруг углов здания из-за переоценки турбулентной кинетической энергии в зонах падения. Это оказывает большое влияние на точность прогноза образования сугроба, сформированного вокруг зданий. Поэтому в последних исследованиях использовались модифицированные  $K-\epsilon$ -модели.

## 2. Погрешности методов вычислительной гидродинамики и перспективы ее развития

Понятия и параметры, используемые в моделировании сугробов, в основном получены эмпирически из наблюдений и экспериментов. Многие наблюдения и эксперименты были основаны на простом дрейфующем пограничном слое, разработанном на плоской поверхности. Однако поле потока вокруг зданий включает в себя ускорения и торможения из-за сепарирования и рециркуляции. Например, модель оценки скорости снеготранспорта в процессе оседания, предложенная в 1990 г. [28], часто используется во многих исследованиях. Константа в модели определялась наблюдением в дрейфующем пограничном слое. Однако следует отметить, что предлагаемое соотношение дает повышенную скорость снеготранспорта, исходя из предположения, что дрейфующий снег в слое оседания достиг своего равновесного состояния, где распределение скорости ветра не изменяется. Таким образом, эмпирическое уравнение

скорости снежного покрова, используемое во всех предыдущих исследованиях, не работает надлежащим образом для сугробов, сопровождаемых быстрым ускорением и замедлением потока, такими как обтекание зданий. Необходимо дополнительно рассматривать применимость и обоснованность моделирования подпроцессов в слое оседания на стадии развития (неравновесное состояние). Также следует отметить, что применяемое ранее CFD-моделирование снежного покрова основано на решении уравнений Навье-Стокса (RANS), основанном на числе Рейнольдса. Однако в реальных ситуациях поведение снега тесно связано с реальными эффектами, присутствующими в поверхностном пограничном слое.

Большинство предыдущих исследований в основном касалось только образования сугробов из-за ветра во время одного снежного события. Однако распределение снега в застроенных средах зависит не только от ветра, но и от многих других факторов, таких как температура, солнечная радиация и искусственное тепло от зданий. Эти метеорологические эффекты на снежном покрове были изучены для прогнозирования лавины, но очень немногие исследования рассматривали эти эффекты в промышленном и гражданском строительстве.

Точность и надежность CFD-моделирования являются предметом дискуссий, и исследования по проверке и валидации решений являются обязательными. Валидация определяется как процесс оценки неопределенности моделирования с использованием контрольных экспериментальных данных и оценки знака и величины самой ошибки моделирования. В процессе проверки достоверные данные измерений, в которых четко определены граничные условия, предоставили только несколько исследований.

Как упоминалось ранее, CFD-моделирование имеет большое преимущество в том, что он может предоставить подробную информацию о соответствующих переменных потока во всей области расчета. Такие возможности важно использовать не только для получения картины распределения снега, но и изучать соотношения вкладов снеговых частиц, падающих с неба и переносимых с поверхности земли до общего сугроба. Анализируя пути поступления снега, можно более точно разрабатывать мероприятия по защите от снеговых заносов.

### 3. Построение карты распределения снега на некоторых формах крыш при помощи стандартной *k-ε*-модели турбулентного потока

Построение карт распределения снега выполняем для двух типов крыш: скатной и плоской ступенчатой. Модели зданий для анализа и их размеры показаны на рисунке 3.

Задача построения схемы распределения снега на поверхности крыши решается с использованием механизма метелевого снегопереноса. Это значит, что равновесная величина массового потока  $q$  может быть выражена как функция от скоростей. В данном случае применяется соотношение, предложенное Дюниным [29]:

$$q = c \times U^2 \times (U - U_{th}), \quad (1)$$

где  $c$  – константа, принимаемая равной  $3,34 \times 10^{-5} \text{ кг}/(\text{с}^2 \text{ м}^4)$ ;

$U$  – средняя скорость ветра на контрольной высоте, м/с;

$U_{th}$  – пороговая скорость ветра, при которой начинается массоперенос.

Следовательно, для построений с использованием механизма метелевого снегопереноса необходимо построить карту распределения скоростей ветра на поверхностях здания, где может накапливаться снег. Для построения распределения скоростей применяется стандартная *k-ε*-модель турбулентного потока. Ветровой профиль моделируется согласно [30] для основной базовой скорости ветра, равной  $V_{b,0} = 10 \text{ м/с}$ , и типа местности II. Базовое значение скорости ветра определяем по формуле:

$$V_b = c_{dir} \times c_{season} \times V_{b,0} = 1,0 \times 1,0 \times 10 = 10 \text{ м/с}, \quad (2)$$

где  $c_{dir} = 1,0$  – коэффициент, учитывающий направление ветра согласно п. 4.2 [30];

$c_{season} = 1,0$  – сезонный коэффициент согласно п. 4.2 [30].

Зависимость изменения скорости ветра от высоты определяется по формуле:

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) \times v_b, \quad (3)$$

где  $c_r(z)$  – коэффициент, учитывающий тип местности в соответствии с 4.3.2;

$c_o(z) = 1,0$  – орографический коэффициент по 4.3.3.

Зависимость коэффициента, учитывающего тип местности, от высоты определяется по формуле:

$$c_r(z) = \begin{cases} k_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), & \text{при } z_{min} \leq z \leq z_{max}; \\ c_r(z_{min}), & \text{при } z \leq z_{min}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $z_0 = 0,05 \text{ м}$  – параметр шероховатости по таблице 4.1 [30];

$k_r$  – коэффициент местности, зависящий от параметра шероховатости  $z_0$  по следующей формуле:

$$k_r = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,ij}}\right)^{0,07}, \quad (5)$$

где  $z_{0,ij} = 0,05 \text{ м}$  – для типа местности II по таблице 4.1 [30];

$z_{min} = 2 \text{ м}$  – минимальная высота по таблице 4.1 [30];

$z_{max} = 200 \text{ м}$ .

Поставляя значения в формулу (4) и (5), получим следующую зависимость:

$$c_r(z) = \begin{cases} k_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), & \text{при } z_{min} \leq z \leq z_{max}; \\ k_r \times \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right), & \text{при } z \leq z_{min}. \end{cases} \quad (6)$$

$$c_r(z) = \begin{cases} 0,19 \times \left(\frac{0,05}{0,05}\right)^{0,07} \times \ln\left(\frac{z}{0,05}\right), & \text{при } 2 \text{ м} \leq z \leq 200 \text{ м}; \\ 0,19 \times \left(\frac{0,05}{0,05}\right)^{0,07} \times \ln\left(\frac{2}{0,05}\right), & \text{при } z \leq 2 \text{ м}. \end{cases} \quad (7)$$

$$c_r(z) = \begin{cases} 0,19 \times \ln\left(\frac{z}{0,05}\right), & \text{при } 2 \text{ м} \leq z \leq 200 \text{ м}; \\ 0,7, & \text{при } z \leq 2 \text{ м}. \end{cases} \quad (8)$$

Подставляя значения уравнения (8) в выражение (3), получим профиль изменения скорости ветра по высоте:

$$v_m(z) = \begin{cases} 0,7 \times 1,0 \times 10, & \text{при } z \leq 2 \text{ м}; \\ 0,19 \times \ln\left(\frac{z}{0,05}\right) \times 1,0 \times 10, & \text{при } 2 \text{ м} \leq z \leq 200 \text{ м}. \end{cases} \quad (9)$$

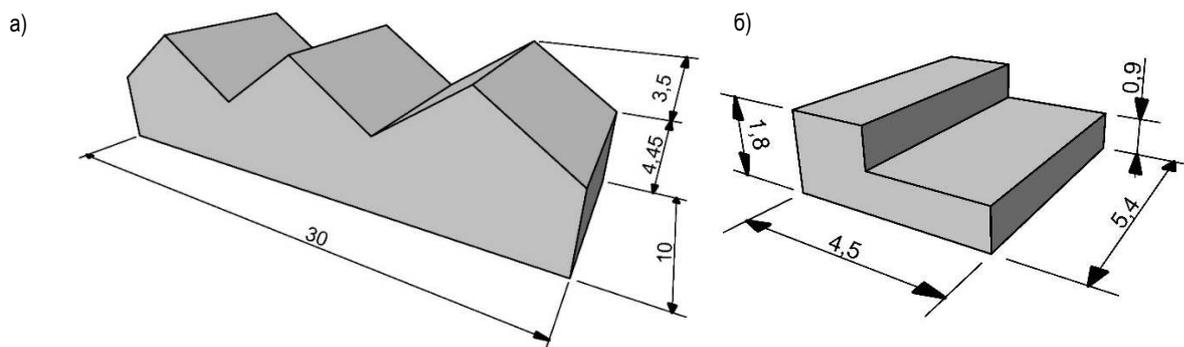
$$v_m(z) = \begin{cases} 7 \text{ м/с}, & \text{при } z \leq 2 \text{ м}; \\ 1,9 \times \ln\left(\frac{z}{0,05}\right), & \text{при } 2 \text{ м} \leq z \leq 200 \text{ м}. \end{cases} \quad (10)$$

Построение карты распределения скоростей ветра на поверхностях здания выполняется при помощи CFD-модуля в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.4. Модель здания со скатной крышей разделена на 801624 объемных конечных элемента, с плоской ступенчатой крышей – на 234538 объемных конечных элемента. Конечно-элементные модели и результаты построения карты распределения скоростей ветра показаны на рисунках 4 и 5 соответственно.

В качестве исходных данных для определения массы накопленного снега принимаем снегопад с параметрами, представленными в таблице 2.

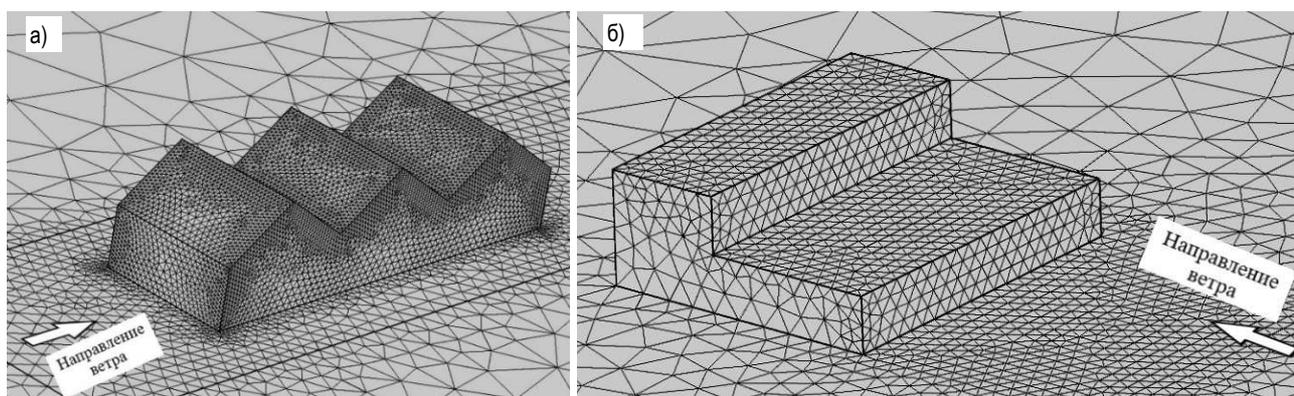
**Таблица 2** – Параметры снегопада, используемые при определении накопления снега на поверхностях зданий

Интенсивность снегопада, $q_0$	10 мм/ч=0,01 м/ч
Продолжительность снегопада, $t$	4 ч
Плотность свежеснегоснега, $\rho$	100 кг/м <sup>3</sup>
Пороговая скорость, $U_{th}$	5 м/с



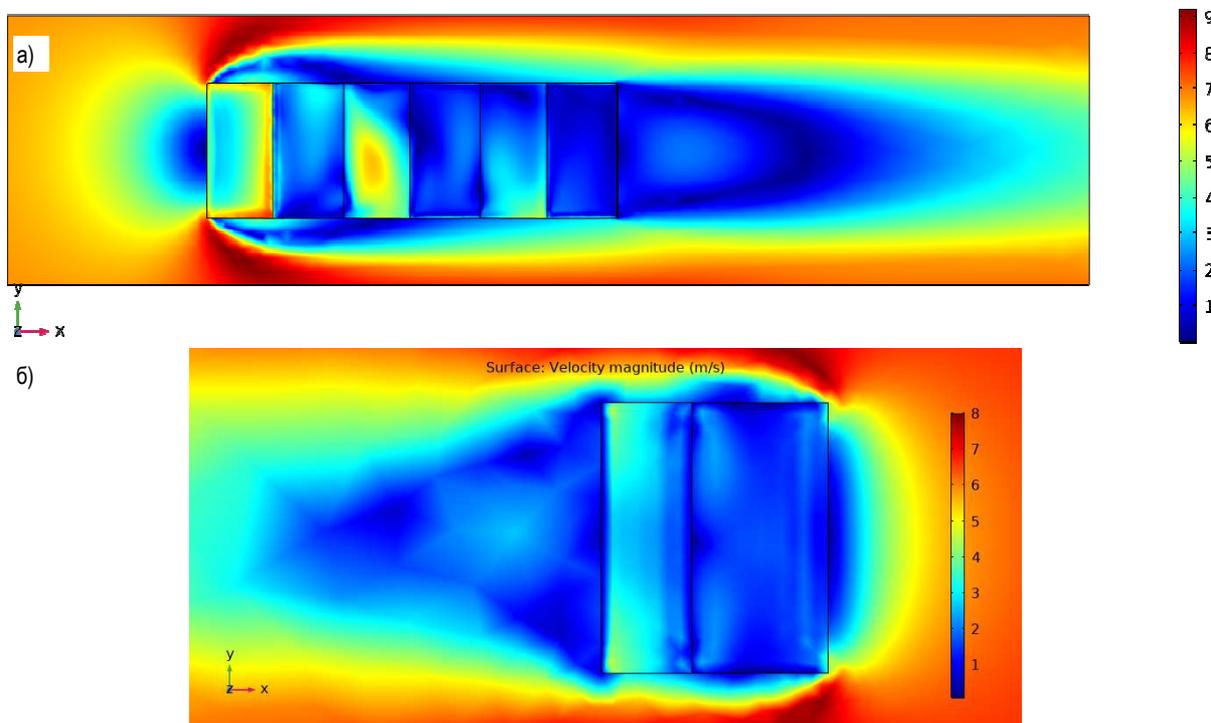
а) со скатной крышей, б) с плоской ступенчатой крышей

**Рисунок 3** – Модели зданий, принятые для анализа



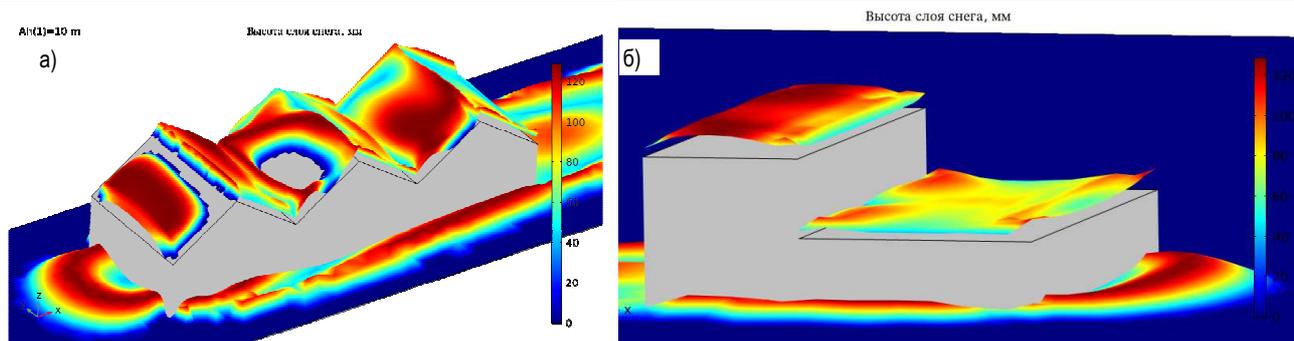
а) со скатной крышей, б) с плоской ступенчатой крышей

**Рисунок 4** – Конечно-элементные модели зданий



а) со скатной крышей, б) с плоской ступенчатой крышей

**Рисунок 5** – Построение карты распределения скоростей ветра на поверхностях зданий



а) со скатной крышей, б) с плоской ступенчатой крышей

**Рисунок 6** – Построение карты распределения снега на поверхностях зданий

Массовое накопление снега в  $i$ -й поверхности определяется по формуле:

$$q_i = q_e - q_{n,i}, \text{ кг/м}^2, \quad (11)$$

где  $q_e$  – массовое накопление снега в результате снегопада без учета воздействия ветра;

$q_{n,i}$  – массовый перенос снега под воздействием ветра во время снегопада.

Массовое накопление снега без учета воздействия ветра определяется из предположения, что в каждой точке поверхности интенсивность снегопада одинакова и определяется по формуле:

$$q_e = q_0 \times t \times \rho = 0,01 \times 4 \times 100 = 4 \text{ кг/м}^2. \quad (12)$$

Массовый перенос снега под воздействием ветра во время снегопада в каждой точке поверхности определяем по формуле (1) в зависимости от скорости ветра в данной точке. При построении карт распределения снега для наглядности массовый расход приведен к высоте слоя накопленного снега путем деления на плотность свежевыпавшего снега:

$$h_{\text{снега},i} = q_i / \rho. \quad (13)$$

Полученные результаты показывают, что стандартная  $k$ - $\epsilon$ -модель турбулентного потока в целом отражает качественное распределение воздушных потоков вокруг здания, а карты распределения снега по поверхностям позволяют качественно оценить схему образования снежных сугробов. Однако на рисунке 6а вдоль коньков и вдоль скатов по краям имеются артефакты – зоны с нехарактерным увеличением высоты слоя снега. Похожие артефакты имеются и на рисунке 6б вдоль верхних продольных ребер. Наличие данных артефактов объясняется не достаточным соответствием принятого в модели механизма метелевого переноса снега, действительным процессам, происходящим при метелях [4, 21]. Эмпирическая зависимость в формуле (1) получена в результате натурных наблюдений в полевых условиях и приводит к погрешностям в местах резкого изменения направления и скорости ветра (сложной конфигурации пограничного слоя).

### Заключение

В этой статье были рассмотрены исследования при помощи CFD-моделирования по образованию сугробов вокруг зданий, проводимые с различными исследовательскими целями, конфигурациями, граничными условиями и подходами, чтобы показать перспективы данных методов. На основании данных материалов можно сформулировать следующие выводы:

- Моделирование методами вычислительной гидродинамики, применяемое к образованию снежных сугробов вокруг зданий, имеет историю более двадцати лет, и соответствующие исследования интенсивно проводились в различных областях.
- В ходе предыдущих исследований по разработке моделей было подтверждено, что схемы распределения снега, т. е. сдувание с наветренных подветренных сторон перед зданием и осадение за ним, могут быть воспроизведены CFD-моделированием качественно и количественно лишь для конкретных конфигураций.
- Необходимы дальнейшие исследования применимости CFD-моделирования к более сложным конфигурациям зданий.

- Необходимо уделять дополнительное внимание сложному полю потока вокруг зданий, который является неравновесным состоянием из-за ускорения и замедления потока, в разработке модели.
- Точность и надежность моделирования CFD следует проверять с использованием надежных данных измерений. Важно улучшить базу данных валидации, используя передовые экспериментальные установки.
- На практике необходимо более широко применять отличительное преимущество CFD-моделирования, которое заключается в том, что оно может предоставить подробную информацию о соответствующих переменных потока во всей области расчета.

### Список цитированных источников

1. Kind, R. J. Snow Drifting. Handbook of Snow. Principles, Processes // Management and Use. D.M. Gray. – Pergamon Press, 1981.
2. Кузьмин, П. П. Формирование снежного покрова и методы определения снегозапасов. – Ленинград : Гидрометеорологическое издательство, 1960. – 173 с.
3. Iversen, J. D. Drifting-snow similitude-transport rate and roughness modeling // J. Glaciol. – 1980. – Т. 26. – Вып. 94. – С. 393–403.
4. Naaim, M. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models / M. Naaim, F. Naaim-Bouvet, H. Martinez // Ann. Glaciol. Cambridge University Press, 1998. – Т. 26. – С. 191–196.
5. Kobayashi, D. Studies of Snow Transport In Low-Level Drifting Snow\* // Contrib. from Inst. Low Temp. Sci. – 1972.
6. Isyumov, N. An Approach to the Prediction of Snow Loads. – University of Western Ontario, 1971.
7. Anno, Y. Requirements for modeling of a snowdrift // Cold Reg. Sci. Technol. Elsevier, 1984. – Т. 8. – Вып. 3. – С. 241–252.
8. Irwin, P. A. Application of Snow Simulation Model Tests to Planning and Design / P. A. Irwin, C. J. Williams // Proc. East. Snow Conf. 28, 40th Annu. Meet, 1983. – С. 18–130.
9. Isyumov, N. Wind Tunnel Modeling of Snow Accumulations on Large Area Roofs / N. Isyumov, M. Mikitiuk // Proc. Second Int. Conf. Snow Eng. – Santa Barbara CA: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory // Hanover NH, July, 1992. – С. 181–193.
10. O'Rourke, M. Laboratory Studies of snow Drifts on Multilevel Roofs / M. O'Rourke, N. Weitman // Proc. Second Int. Conf. snow Eng. – Santa Barbara CA : U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover NH, July, 1992. – С. 195–206.
11. Huang, N. Simulation of snow drift and the effects of snow particles on wind / N. Huang, J. Zhang // Model. Simul. Eng. – 2008. – Т. 2008.
12. Peterka, J. A. On the relaxation of saltation length as a modeling criteria for particulate transport by wind / J. A. Peterka, R. L. Petersen // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 1990.
13. Toparlak, Y. A review on the CFD analysis of urban microclimate / Y. Toparlak [и др.] // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2017. – Т. 80. – С. 1613–1640.
14. Murakami, S. Computational wind engineering // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 1990. – Т. 36. – С. 517–538.
15. Blocken, B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 2014. – Т. 129. – С. 69–102.

16. Uematsu, T. Three-dimensional numerical simulation of snowdrift / Uematsu T. [и др.] // Cold Reg. Sci. Technol. Elsevier. – 1991. – Т. 20. – Вып. 1. – С. 65–73.
17. Liston, G. E. A two-dimensional computational model of turbulent atmospheric surface flows with drifting snow / G. E. Liston, R. L. Brown, J. D. Dent // Ann. Glaciol. – 1993. – Т. 18. – С. 281–286.
18. Bang, B. Computer simulation of wind speed, wind pressure and snow accumulation around buildings (SNOW-SIM) / B. Bang [и др.] // Energy Build. Elsevier. – 1994. – Т. 21. – Вып. 3. – С. 235–243.
19. Moore, I. A numerical model of blowing snow around an arctic building\_Moors and Mobbs\_1994.pdf / I. Moore [и др.] // Ann. Glaciol. – 1994. – Т. 20. – С. 341–346.
20. Sundsbø P.-A. Numerical simulations of wind deflection fins to control snow accumulation in building steps / P.-A. Sundsbø // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 1998. – Т. 74–76. – С. 543–552.
21. Tominaga Y., Mochida A. CFD prediction of flowfield and snowdrift around a building complex in a snowy region / Y. Tominaga, A. Mochida // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 1999. – Т. 81. – Вып. 1–3. – С. 273–282.
22. Beyers, J. H. M. Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube / J. H. M. Beyers, P. A. Sundsbø, T. M. Harms // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 2004. – Т. 92. – Вып. 9. – С. 725–747.
23. Beyers, M. Modeling transient snowdrift development around complex three-dimensional structures / M. Beyers, B. Waechter // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 2008. – Т. 96. – Вып. 10–11. – С. 1603–1615.
24. Tominaga, Y. CFD modeling of snowdrift around a building : An overview of models and evaluation of a new approach / Y. Tominaga, T. Okaze, A. Mochida // Build. Environ. Pergamon. – 2011. – Т. 46. – Вып. 4. – С. 899–910.
25. Okaze, T. Development of a new  $k-\epsilon$  model to reproduce the aerodynamic effects of snow particles on a flow field / T. Okaze [и др.] // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 2015. – Т. 144. – С. 118–124.
26. Zhou, X. Numerical simulation and wind tunnel test for redistribution of snow on a flat roof / X. Zhou [и др.] // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 2016. – Т. 153. – С. 92–105.
27. SERINE, A. The Numerical Simulation of Snowdrift Around a Building / A. SERINE [и др.] // Int. J. Comput. Fluid Dyn. – 2007. – Т. 12. – Вып. 3–4. – С. 249–255.
28. Pomeroy, J. W. A process-based model of snow drifting / J. W. Pomeroy // Ann. Glaciol. – 1989. – Т. 13. – С. 237–240.
29. Dyunin, A. K. Solid flux of snow-bearing air flow / A. K. Dyunin // Tr. Transp. Instituta. – Ottawa : National Research Council of Canada, 1954. – Т. 4. – С. 71–88.
30. Еврокод 1. Воздействия на конструкции : ТКП EN 1991-1-4-2009. – Минск : Минстройархитектуры, 2010. – Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия. – 117 с.
9. Isyumov, N. Wind Tunnel Modeling of Snow Accumulations on Large Area Roofs / N. Isyumov, M. Mikitiuk // Proc. Second Int. Conf. Snow Eng. – Santa Barbara CA: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory // Hanover NH, July, 1992. – С. 181–193.
10. O'Rourke, M. Laboratory Studies of snow Drifts on Multilevel Roofs / M. O'Rourke, N. Weitman // Proc. Second Int. Conf. snow Eng. – Santa Barbara CA : U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover NH, July, 1992. – С. 195–206.
11. Huang, N. Simulation of snow drift and the effects of snow particles on wind / N. Huang, J. Zhang // Model. Simul. Eng. – 2008. – Т. 2008.
12. Peterka, J. A. On the relaxation of saltation length as a modeling criteria for particulate transport by wind / J. A. Peterka, R. L. Petersen // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 1990.
13. Toparlar, Y. A review on the CFD analysis of urban microclimate / Y. Toparlar [и др.] // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2017. – Т. 80. – С. 1613–1640.
14. Murakami, S. Computational wind engineering // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 1990. – Т. 36. – С. 517–538.
15. Blocken, B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 2014. – Т. 129. – С. 69–102.
16. Uematsu, T. Three-dimensional numerical simulation of snowdrift / Uematsu T. [и др.] // Cold Reg. Sci. Technol. Elsevier. – 1991. – Т. 20. – Вып. 1. – С. 65–73.
17. Liston, G. E. A two-dimensional computational model of turbulent atmospheric surface flows with drifting snow / G. E. Liston, R. L. Brown, J. D. Dent // Ann. Glaciol. – 1993. – Т. 18. – С. 281–286.
18. Bang, B. Computer simulation of wind speed, wind pressure and snow accumulation around buildings (SNOW-SIM) / B. Bang [и др.] // Energy Build. Elsevier. – 1994. – Т. 21. – Вып. 3. – С. 235–243.
19. Moore, I. A numerical model of blowing snow around an arctic building\_Moors and Mobbs\_1994.pdf / I. Moore [и др.] // Ann. Glaciol. – 1994. – Т. 20. – С. 341–346.
20. Sundsbø P.-A. Numerical simulations of wind deflection fins to control snow accumulation in building steps / P.-A. Sundsbø // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 1998. – Т. 74–76. – С. 543–552.
21. Tominaga Y., Mochida A. CFD prediction of flowfield and snowdrift around a building complex in a snowy region / Y. Tominaga, A. Mochida // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 1999. – Т. 81. – Вып. 1–3. – С. 273–282.
22. Beyers, J. H. M. Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube / J. H. M. Beyers, P. A. Sundsbø, T. M. Harms // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 2004. – Т. 92. – Вып. 9. – С. 725–747.
23. Beyers, M. Modeling transient snowdrift development around complex three-dimensional structures / M. Beyers, B. Waechter // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 2008. – Т. 96. – Вып. 10–11. – С. 1603–1615.
24. Tominaga, Y. CFD modeling of snowdrift around a building : An overview of models and evaluation of a new approach / Y. Tominaga, T. Okaze, A. Mochida // Build. Environ. Pergamon. – 2011. – Т. 46. – Вып. 4. – С. 899–910.
25. Okaze, T. Development of a new  $k-\epsilon$  model to reproduce the aerodynamic effects of snow particles on a flow field / T. Okaze [и др.] // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 2015. – Т. 144. – С. 118–124.
26. Zhou, X. Numerical simulation and wind tunnel test for redistribution of snow on a flat roof / X. Zhou [и др.] // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier. – 2016. – Т. 153. – С. 92–105.
27. SERINE, A. The Numerical Simulation of Snowdrift Around a Building / A. SERINE [и др.] // Int. J. Comput. Fluid Dyn. – 2007. – Т. 12. – Вып. 3–4. – С. 249–255.
28. Pomeroy, J. W. A process-based model of snow drifting / J. W. Pomeroy // Ann. Glaciol. – 1989. – Т. 13. – С. 237–240.
29. Dyunin, A. K. Solid flux of snow-bearing air flow / A. K. Dyunin // Tr. Transp. Instituta. – Ottawa : National Research Council of Canada, 1954. – Т. 4. – С. 71–88.
30. Еврокод 1. Воздействия на конструкции : ТКП EN 1991-1-4-2009. – Минск : Минстройархитектуры, 2010. – Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия. – 117 с.

#### References

1. Kind, R. J. Snow Drifting. Handbook of Snow. Principles. Processes // Management and Use. D.M. Gray. – Pergamon Press, 1981.
2. Kuzmin, P. P. Snow Cover Formation and Snow Load Determination Methods. – Leningrad : Hydrometeorological publishing house, 1960. – 173 p.
3. Iversen, J. D. Drifting-snow similitude-transport-rate and roughness modeling // J. Glaciol. – 1980. – Т. 26. – Вып. 94. – С. 393–403.
4. Naaim, M. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models / M. Naaim, F. Naaim-Bouvet, H. Martinez // Ann. Glaciol. Cambridge University Press, 1998. – Т. 26. – С. 191–196.
5. Kobayashi, D. Studies of Snow Transport In Low-Level Drifting Snow\* // Contrib. from Inst. Low Temp. Sci. – 1972.
6. Isyumov, N. An Approach to the Prediction of Snow Loads. – University of Western Ontario, 1971.
7. Anno, Y. Requirements for modeling of a snowdrift // Cold Reg. Sci. Technol. Elsevier, 1984. – Т. 8. – Вып. 3. – С. 241–252.
8. Irwin, P. A. Application of Snow Simulation Model Tests to Planning and Design / P. A. Irwin, C. J. Williams // Proc. East. Snow Conf. 28, 40th Annu. Meet, 1983. – С. 18–130.