

2. Гвоздев, А.А. Испытание безбалочных перекрытий до разрушения // Строительная промышленность. – М.: 1931. – № 11. – 12 с.
3. Гвоздев, А.А. Расчет несущей способности конструкции по методу предельного равновесия. – М.: Стройиздат, 1949. – 143 с.
4. Городецкий, А.С. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс ЛИРА-Windows / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров, Е.Б. Стрелецкий [и др.]. – К.: Факт, 1997. – 137 с.
5. Лихтарников, Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1979. – 319 с., ил.
6. Мордич, А. И. Рекомендации по расчету и конструированию монолитных железобетонных каркасов многоэтажных зданий системы БелНИИС с армированием плоских дисков перекрытий пространственными (объемными) арматурными каркасами. – Минск: БелНИИС, 2003. – 14 с.
7. Надежность строительных конструкций. Общие принципы: СТБ ISO 2394 -2007. – Введ. 01.07.2008 – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2007. – 69 с.
8. НИИЖБ. Инструкция по расчету статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом перераспределения усилий. – М.: Госстройиздат, 1961 – 111 с
9. Рекомендации по проектированию конструктивных систем в особых расчетных ситуациях. Защита от прогрессирующего обрушения. - Брест: БрГТУ, 2010. – 91 с.
10. Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций: ТКП ЕН 1990-2007. – Минск: Минстройархитектуры, 2008.
11. Еврокод. Бетонные и железобетонные конструкции: ТКП ЕН 1992-2009. – Минск: Минстройархитектуры, 2009.

УДК 624.042.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКИ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

Матвеевко Е. В.

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. Значительное количество сугробов приводит к образованию неравномерных нагрузок и чрезмерному скоплению снега 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 со снегом на застроенных территориях, необходимо с достаточной точностью прогнозировать качественное распределение снега на крышах зданий и вокруг них.

В целом перенос снега под воздействием ветра подразделяется на три процесса: ползучесть, солевание и суспензия [1,2]. Поземок – 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 проводилось огромное количество экспериментальных исследований 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 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 и требуют много времени. Также 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].

Тем не менее в последнее десятилетие произошло резкое увеличение вычислительной мощности компьютеров, а также развитие компьютерного программного обеспечения для математического моделирования. 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 предшествующих достижений при численном моделировании 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 раз-

личным 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 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.

Таблица 1 – Обзор исследований в области снегопереноса с применением методов вычислительной гидродинамики

Год	Вид модели	Модель турбулентного потока	Верификация
1991	3D	Модель Буссинеска (0 уравнений)	натурные наблюдения
1993	2D/преграда	Стандартная k-ε	нет
1994	3D/здания	Стандартная k-ε	натурные наблюдения
1994	3D/здание	Модель Буссинеска (0 уравнений)	натурные наблюдения
1998	2D/сечение здания	Модель Спаларта-Альмараса (k)	нет
1998	2D/преграда	Модифицированная k-ε	аэродинамическая труба
1999	3D/реальное здание	Модифицированная k-ε	нет
2000	3D/модели зданий	Стандартная k-ε	натурные наблюдения
2004	3D/отдельный куб	Стандартная k-ε	натурные наблюдения
2008	3D/здания	Стандартная k-ε	натурные наблюдения
2011	3D/модель здания	Модифицированная k-ε	натурные наблюдения
2015	3D/массив из стоек	Модифицированная k-ε	нет
2015	2D/driftng snow boundary layer	Модифицированная k-ε	натурные наблюдения
2016	3D/модель здание	Модифицированная k-ε	аэродинамическая труба

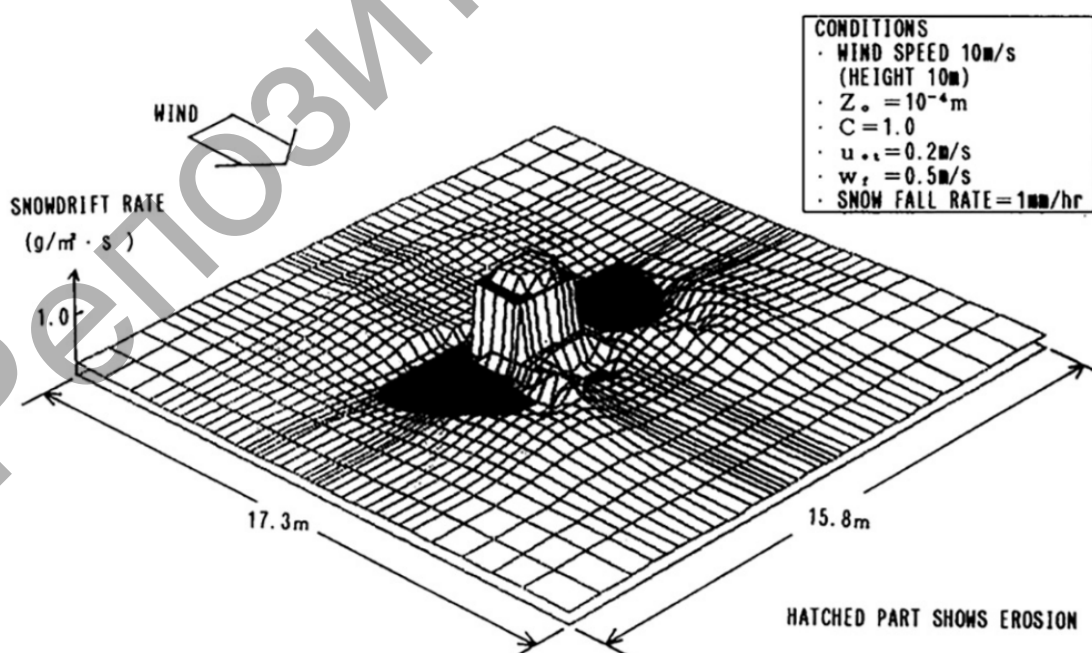
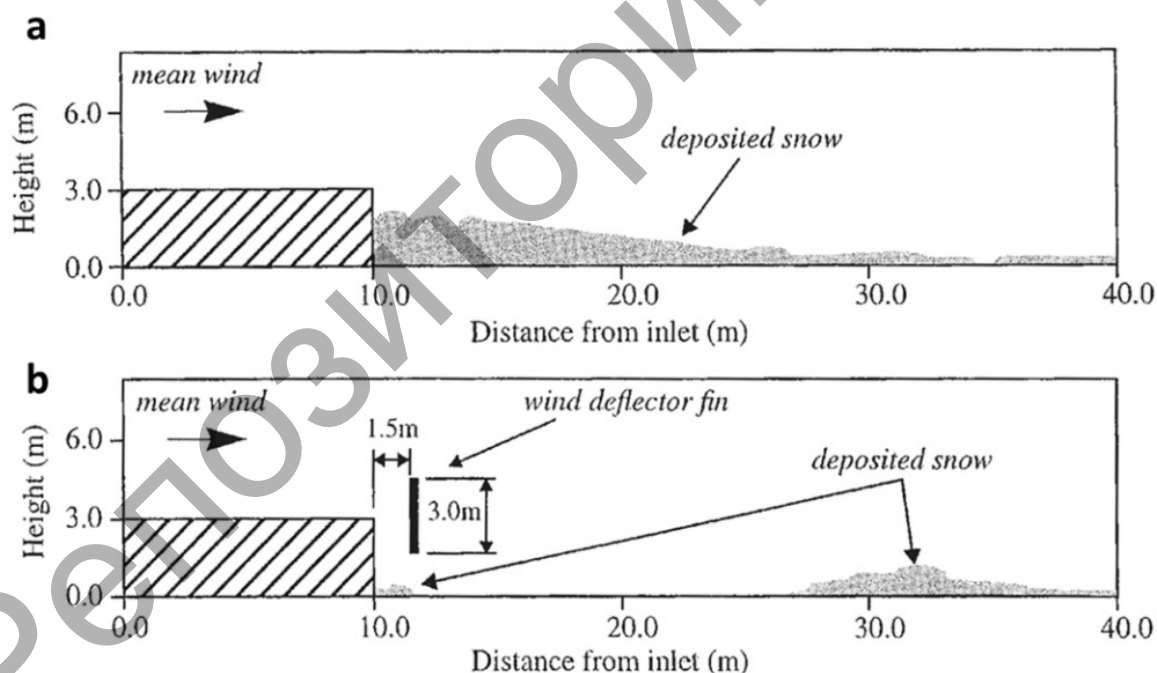


Рисунок 1 – Трехмерное распределение снежных сугробов с применением метода вычислительной гидродинамики, впервые полученное в 1991 г. [16]

Вскоре после этого в 1993 предпринимались попытки анализировать распределение снега вокруг двумерного вертикального ограждения, используя стандартную к-ε-модель турбулентного потока [17]. В 1994 году была предложена модель сугробов двухфазного потока, называемая «обобщенной моделью дрейфового потока». Данная модель применялась для анализа осаждения 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 снегоперенос 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].



a) при отсутствии экрана для отклонения ветра,
b) при наличии экрана для отклонения ветра

Рисунок 2 – Численное прогнозирование накопления снега с подветренной стороны здания

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 к-ε-модель турбулентного потока,

чтобы учесть влияние частиц снега на турбулентность [4]. Эта модель часто применяется в последующих исследованиях.

Также были предложены другие различные подходы. Например, метод Лагранжа для анализа поведения снежных частиц в снегопереносе вокруг двумерного здания [19].

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, присущие 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. Неточности методов вычислительной гидродинамики и перспективы 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 плоскости. Однако поле потока вокруг зданий включает в себя ускорения и торможения из-за сепарирования и рециркуляции. Например, модель оценки скорости снегопереноса в процессе оседания, предложенная в 1990 г. [20], часто используется во многих исследованиях. Константа в модели определялась наблюдением в дрейфующем пограничном слое. Однако следует отметить, что предлагаемое соотношение дает повышенную скорость снегопереноса, 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

ми. 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 оно 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.

Выводы.

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 и подветренных сторон перед зданием и осаждение за ним, могут быть воспроизведены CFD-моделированием качественно и количественно для общих конфигураций.

- Необходимы дальнейшие исследования применимости CFD-моделирования к более сложным конфигурациям зданий, таким как проблемы со снегом на крыше.

- Разработан метод прогнозирования с учетом различного метеорологического воздействия, включая термические эффекты.

- 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.

- При практическом применении необходимо более широко применять отличительное преимущество CFD-моделирования, которое заключается в том, то есть он 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 снеготолщин. - 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. – 393–403 с.

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. – 191–196 с.
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. – 241–252 с.
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.* - 18–130 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.* - 181–193 с.
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.* - 195–206 с.
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. – 1613–1640 с.
14. Blocken, B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier.* – 2014. – Т. 129. – 69–102 с.
15. Murakami, S. Computational wind engineering // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier.* – 1990. – Т. 36. – 517–538 с.
16. Uematsu, T. Three-dimensional numerical simulation of snowdrift / T. Uematsu [и др.] // *Cold Reg. Sci. Technol. Elsevier.* – 1991. – Т. 20, вып. 1. – 65–73 с.
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. – 281–286 с.
18. Bang, B. Computer simulation of wind speed, wind pressure and snow accumulation around buildings (SNOW-SIM) / Bang B. [и др.] // *Energy Build. Elsevier.* – 1994. – Т. 21, вып. 3. – 235–243 с.
19. 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. – 249–255 с.
20. Pomeroy, J.W. A process- based model of snow drift ing // *Ann. Glaciol.* – 1989. – Т. 13. - 237–240 с.

УДК 624.012.36

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНЬКОВОЙ ЗОНЫ БАЛОК КРИВОЛИНЕЙНОГО ОЧЕРТАНИЯ

Матвеевко Н. В., Малиновский В. Н.

Отличительной особенностью при проектировании балок криволинейного очертания является конструирование коньковой зоны. При этом коньковой зоной считается зона балки, расположенной по обе стороны от нормального сечения, проходящего по коньку ломаной верхней грани. Согласно рекомендациям по расчету и конструированию двускатных балок [1] армирование коньковой