

## Модели снеговой нагрузки

*Краснощечков Юрий Васильевич*

*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет*

*доктор технических наук*

*Долженко Кристина Павловна*

*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет*

*Студент*

### Аннотация

В статье представлены сведения о снеговой нагрузке, классификация воздействий для моделирования математических моделей, сравнение основных положений российских норм, Еврокода, национальных строительных норм Канады и строительных норм Американской ассоциации.

**Ключевые слова:** снеговая нагрузка, математическое моделирование, нормы проектирования, нормативные положения.

## Snow load models

*Krasnoshchekov Yuri Vasilyevich*

*Siberian State Automobile and Highway University*

*Doctor of Technical Sciences*

*Dolzhenko Kristina Pavlovna*

*Siberian State Automobile and Highway University*

*Student*

### Abstract

The article presents information about snow load, classification of impacts for modeling mathematical models, comparison of the main provisions of Russian norms, Eurocode, national building codes of Canada, and building codes of the American Association.

**Keywords:** snow load, mathematical modeling, design standards, regulations.

Внешняя среда воздействует на конструкции здания, что приводит к деформациям или качественным изменениям, которые влияют на долговечность здания.

И природа таких воздействий является основой для составления математических моделей, которые описывают зависимость признаков и факторов, от которых зависят воздействия. Для точного выбора модели воздействия необходимо провести анализ причин их возникновения и изменения и способов наблюдения и обработки результатов измерения. [1]

Для правильного анализа необходимо учитывать классификацию воздействий по таким признакам, как: происхождение, характер изменения во времени и продолжительность действия, зависимость от деятельности человека или природных факторов, характер взаимодействия с конструкцией.

Снеговая нагрузка на покрытия определяется весом снегового покрова на единицу площади. Разница в количестве осадков в разные годы служит причиной многолетней изменчивости снеговой нагрузки.

### Основная часть

Базовое значение снеговой нагрузки представляет собой расчетный вес снегового покрова на  $1 \text{ м}^2$  горизонтальной поверхности земли, превышаемый один раз в 25 лет (точнее, зим). В нормах он обозначен  $S_g$ . Снеговая нагрузка на кровлю формируется под воздействием ряда дополнительных факторов, взаимная связь и учет которых отображены на рис. 1.

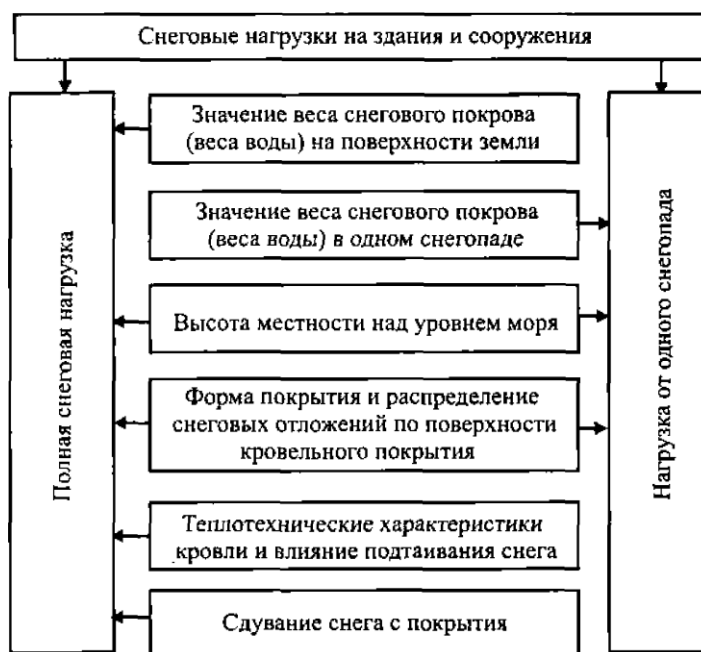


Рисунок 1 - Факторы, влияющие на снеговую нагрузку

Полная снеговая нагрузка действует на здания и сооружения, где снег накапливается в течение всей зимы. При ее нормировании необходимо учесть все влияющие факторы.

Классификация воздействий является основой их моделирования и контроля надежности конструкций. Описание воздействий осуществляется с помощью математических моделей, имеющих, как правило, мало общего с процессом нагружения конструкций. Эти модели отражают взаимосвязь различных признаков и факторов, от которых зависят воздействия. Для правильного выбора моделей воздействия требуется анализ причин их возникновения и изменения, пространственно-временной изменчивости, а также способов наблюдения, обработки и оценки результатов измерений. Анализ может быть более результативным, если опираться на классификацию воздействий по признакам, основными из которых являются:

происхождение, характер изменения во времени и продолжительность действия; зависимость от деятельности человека или природных факторов; характер взаимодействия с конструкцией; распределение в пространстве и времени; правила нормирования и др.[1].

Максимальное значение снеговой нагрузки накапливается к концу зимы и действует в течение одной, двух декад, т.е. относительно короткий период времени. При расчете деформация требуется учитывать длительную составляющую снеговой нагрузки, которая действует в течение нескольких месяцев и может влиять на процессы ползучести и развития повреждений.

В определенных ситуациях разрушение конструкций под действием снеговой нагрузки может произойти не в конце зимы, а сразу после обильного снегопада. А.Р. Ржаницын выделяет несколько причин этого [2]:

- свежеснеживший снег рыхлый и не имеет собственной жесткости типа плиты или оболочки, как слежавшийся;
- при обильном снегопаде более вероятно образование "снеговых мешков" и заносов, так как весь снег выпадает при одном направлении ветра;
- на покрытиях горячих цехов снег долго не лежит из-за положительной температуры поверхности кровли, а при сильном снегопаде он может не успеть быстро растаять;
- на обычных утепленных кровлях снеговые заносы после обильных снегопадов часто расчищают или снег слеживается и приобретает некоторую собственную жесткость, что является благоприятным фактором для конструкций.

### **Обзор нормативных документов в части математического (численного) моделирования снеговых нагрузок на покрытия**

Прогресс в определении снеговых нагрузок на покрытия в настоящее время прослеживается области математического моделирования [3]. Несмотря на разработку ряда зарекомендовавших себя математических моделей, их алгоритмических и программных реализаций, уже применяемых на практике, российские нормативные документы в части определения снеговых нагрузок остаются консервативными и не допускают возможности математического моделирования.

Нормативные положения в различных странах и схемы распределения снеговых нагрузок даже на простейшие покрытия отличаются качественно и количественно.

### **Сравнение основных положений**

Из общего в положениях норм можно выделить следующее:

- Расчёт нагрузки производится по одному и тому же принципу – умножением нормативного веса снегового покрова на квадратный метр поверхности на различные коэффициенты (сноса, термический и др.), в том числе на коэффициент формы, учитывающий переход от

веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие (или несколько таких коэффициентов).

- Присутствуют карты снегового районирования разной степени детализации для определения нормативного веса снегового покрова на квадратный метр поверхности.
- Для определения коэффициента (или коэффициентов) формы присутствуют схемы для следующих типов крыш: – одно- и двускатных; – купольных и цилиндрических; – с перепадом высот; – многопролётных (шедовых и др.)
- Для определения снеговых нагрузок на прочие виды покрытий, не регламентируемые нормами, рекомендуется проводить исследования в удовлетворяющих требованиям аэродинамических трубах [4].

В каждом документе свой набор рассчитываемых величин, причём не для всех можно найти аналоги; детализация карт районирования сильно различается; некоторые нормы допускают применение численного моделирования для расчёта снеговых нагрузок, другие – не оговаривают или напрямую запрещают в силу каких-либо обстоятельств. Также в некоторых нормах присутствуют дополнительные схемы для коэффициентов перехода помимо вышеозначенных. Рассмотрим подробнее каждое из этих положений для каждого из упомянутых документов.

Российские нормы СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» (с изм. 3) [5] приводят следующую формулу для расчёта нормативного значения снеговой нагрузки:

$$S = \mu c_e c_t S_g, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент формы, учитывающий переход от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие,  $c_e$  – коэффициент сноса/ветровой защищённости,  $c_t$  – термический коэффициент,  $S_g$  – нормативный вес снегового покрова на квадратный метр поверхности.

Для получения расчётной нагрузки данное выражение домножается на коэффициент надёжности по нагрузке  $\gamma_f$ , обычно равный 1.4. Изменение 3 в отдельных случаях допустило понижение значения коэффициента  $c_e$  на основании климатических данных для площадки строительства. В отличие от других документов, в российских нормах повышение снеговой нагрузки вблизи перепада рассматривается отдельно для наветренной и подветренной сторон, при этом само по себе понятие направления ветра отсутствует. Также присутствуют схемы для частных случаев покрытий, которые, с точки зрения других документов, оказываются даже избыточны: много внимания уделено фонарям: приведены отдельные схемы для продольных, поперечных фонарей; приведена схема для зданий с двумя перепадами высот; для арочных покрытий и близких к сводчатым. О численном моделировании снеговых нагрузок, в отличие от ветровых [6], в российских нормах ничего не говорится.

Еврокод [7] выделяет три вида снеговой нагрузки: постоянную ( $s_1$ ), экстремальную от давления снега ( $s_2$ ) и экстремальную от снегопереноса на покрытие ( $s_3$ ) и приводит следующие формулы для расчёта значений каждой из них:

$$s_1 = \mu C_e C_t s_k, s_2 = \mu C_e C_t s_{ad}, s_3 = \mu s_{ad}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент формы, учитывающий переход от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие,  $C_e$  – коэффициент сноса/ветровой защищённости,  $C_t$  – термический коэффициент,  $s_k$  – нормативный вес снегового покрова на квадратный метр поверхности,  $s_{ad}=2s_k$ .

Аналогично российским нормам, повышение снеговой нагрузки вблизи перепада рассматривается отдельно для наветренной и подветренной сторон, при этом само по себе понятие направления ветра отсутствует. Коэффициент формы определён для одно- и двускатных крыш с отрицательным уклоном покрытия. В отличие от российских и канадских норм, Еврокод допускает использование численного моделирования для уточнения коэффициента формы наряду с физическим моделированием, однако никаких конкретных требований к применяемым методам не содержит.

Национальные строительные нормы Канады [8] приводят следующую формулу для расчёта нормативного значения снеговой нагрузки:

$$S = I_s S_g (C_b C_w C_s C_a), \quad (3)$$

где  $I_s$  – коэффициент ответственности здания,  $S_g$  – нормативный вес снегового покрова на квадратный метр поверхности,  $C_b$  – базовый коэффициент формы,  $C_w$  – коэффициент сноса/ветровой защищённости,  $C_s$  – коэффициент уклона крыши,  $C_a$  – коэффициент накопления снега на покрытии.

Здесь коэффициенты  $C_b$ ,  $C_s$  и  $C_a$  вместе выступают аналогами коэффициента  $\mu$  из СП и Еврокода. В отличие от других документов, в канадских нормах явно выделяются направления ветра, и рассчитывается нагрузка для каждой из сторон отдельно, но затем берётся наибольшее из полученных значений и назначается для обеих сторон в запас. Строительные нормы Канады напрямую запрещают применение численного моделирования снегонакопления ввиду недостаточных данных о правомерности его использования и физичности получаемых с его помощью результатов.

Строительные нормы Американской ассоциации строителей [9] приводят следующую формулу для расчёта нормативного значения снеговой нагрузки:

$$p_f = 0.7 C_e C_t I_s p_g, \quad (4)$$

где  $C_e$  – коэффициент сноса/ветровой защищённости,  $C_t$  – термический коэффициент,  $I_s$  – коэффициент ответственности здания,  $p_g$  – нормативный вес снегового покрова на квадратный метр поверхности. Также для зданий с пологими крышами существует понятие минимальной нагрузки, рассчитываемой по формуле:

$$p_m = I_s p_g, \quad (5)$$

Для неравномерной нагрузки используется формула:

$$p_s = C_s p_f, \quad (6)$$

где  $C_s$  – коэффициент формы покрытия. Аналогично канадским нормам, явно выделяются направления ветра, и рассчитывается нагрузка для каждой из сторон отдельно, но затем берётся наибольшее из полученных значений и назначается для обеих сторон в запас. Значения коэффициента формы зависят, как видно из формулы 4, от термического коэффициента. В отличие от других документов, в американских нормах прямо указывается, что результаты физического моделирования должны использоваться только вместе с численным моделированием, что на основании одних только продувок коэффициенты формы или значения нагрузок выдаваться не могут. В Приложении к американским нормам [10] содержится классификация численных методов моделирования снегонакопления. Также американские нормы отличает наиболее детальная карта снегового районирования, в ней содержатся данные для всех более-менее крупных населённых пунктов США ввиду обустройства метеорологических станций вблизи аэропортов.

### **Заключение**

В целом различия между разными нормами обусловлены скорее инженерной традицией стран, служащих предпосылками для составления норм, причём во всех отношениях: даже нормативный вес снегового покрова где-то берётся сильно в запас, где-то максимально уточняется для недопущения излишнего запаса прочности. Существенный недостаток всех нормативных документов наблюдается в части легитимизации и регламентации численного моделирования снеговых нагрузок. Данное обстоятельство для всех документов безусловно является тормозящим фактором во внедрении математического моделирования в строительную практику, несмотря на увеличивающуюся потребность в его использовании и нарастающих темпах проведения научных исследований в этом направлении в других странах, таких как Китай, где за последние 5-6 лет вышло несколько десятков статей по исследованиям (например, [11-14]), проведённым при поддержке правительственных грантов.

**Библиографический список**

1. Краснощёков Ю.В., Заполева М. Ю. Основы проектирования конструкций зданий и сооружений: учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 316 с.
2. Ржаницын А. Р. Строительная механика: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1982. 400 с.
3. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. Учебное пособие. М.: Издательство АСВ, 2017. 720 с.
4. ASCE. Wind tunnel testing for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers, 2012.
5. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия
6. Irwin P. A. Lifetime experiences in wind engineering //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2020. Т. 205. С. 104272.
7. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads.
8. National Research Council of Canada. National building code of Canada 2015. – National Research Council Canada, 2015.
9. ASCE 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.
10. ASCE. Wind tunnel testing for buildings and other structures. – American Society of Civil Engineers, 2012.
11. Sun X., He R., Wu Y. Numerical simulation of snowdrift on a membrane roof and the mechanical performance under snow loads //Cold Regions Science and Technology. 2018. Т. 150. С. 15-24
12. Zhou X., Zhang Y., Gu M. Coupling a snowmelt model with a snowdrift model for the study of snow distribution on roofs //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2018. Т. 182. С. 235-251
13. Wang J. et al. Modeling snowdrift on roofs using Immersed Boundary Method and wind tunnel test //Building and environment. 2019. Т. 160. С. 106208.
14. Zhou X. et al. RANS CFD simulations can be successfully used for simulating snowdrift on roofs in a long period of snowstorm //Building simulation. – Tsinghua University Press, 2020. Т. 13. С. 1157-1163.