

Численное моделирование снеговых нагрузок. Особенности и перспективы развития методики

Бритиков Никита Александрович (Москва). Научно-образовательный центр компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НОЦ КМ им. А.Б. Золотова). Эл. почта: n.a.britikov@gmail.com

Белостоцкий Александр Михайлович (Москва). Доктор технических наук, академик РААСН. Научно-образовательный центр компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НОЦ КМ им. А.Б. Золотова). Эл. почта: amb@stadyo.ru

Аннотация. Разработка методологии численного моделирования снеговой нагрузки сегодня является одной из важнейших задач строительной отрасли. Анализ мировых строительных норм и регламентов показывает, что ограниченного набора покрытий и схем распределения коэффициента формы μ недостаточно для обоснованного определения снеговой нагрузки, особенно на большепролётные и уникальные здания и сооружения. Применяющиеся на практике методы физического моделирования также обладают рядом существенных недостатков. В то же время современный уровень развития программных комплексов вычислительной аэрогидродинамики и большое число математических моделей снегонакопления позволяет моделировать снеговую нагрузку численно. Так, представленная в настоящей статье методика позволяет выполнять расчёт снеговой нагрузки на покрытиях зданий и сооружений в стационарной и нестационарной постановках. Нестационарная постановка даёт возможность наблюдать локальное изменение толщины снегового покрова во времени, однако является весьма ресурсоёмкой для расчёта снеговой нагрузки на покрытие в целом. Указанные недостатки решает моделирование в стационарной постановке, при котором основные уравнения модели снегонакопления решаются на «больших» временах. Полученные картины снеготложений в сочетании с рекомендациями нормативных документов позволяют задать значение расчётного коэффициента формы μ для всех зон покрытия. На основе разработанной методики на базе НОЦ КМ им. А.Б. Золотова и Учебно-научно производственной лаборатории аэроакустических исследований строительных конструкций (УНПЛ ААИСК) НИУ МГСУ прорабатывается единая, комплексная расчётно-экспериментальная методология моделирования снеговых нагрузок, объединяющая преимущества физического и численного моделирования. Синтез двух подходов позволяет наиболее ёмко и разносторонне изучить процесс снегонакопления на покрытиях зданий и сооружений.

Ключевые слова: большепролётные здания и сооружения, вычислительная аэрогидродинамика, математическое моделирование, снегонакопление, снегоперенос, уникальные здания и сооружения, численные методы.

Для цитирования. Бритиков Н.А., Белостоцкий А.М. Численное моделирование снеговых нагрузок. Особенности и перспективы развития методики // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 3. – С. 149–153. – DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-149-153.

Numerical Modelling of Snow Loads. Features and Future of the Methodology

Britikov Nikita A. (Moscow). A.B. Zolotov Research and Engineering Center of the Moscow State University of Civil Engineering, (26, Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russia. NRU MGSU). E-mail: n.a.britikov@gmail.com

Belostotsky Alexander M. (Moscow). Doctor of Science in Technology, Academician of RAACS Research and Engineering Center of the Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russia. NRU MGSU). E-mail: amb@stadyo.ru

Abstract. The development of a methodology for numerical modelling of snow loads is one of the most important tasks of the civil engineering industry today. Analysis of the building codes and regulations shows that limited sets of roof types and distributions of the shape coefficient μ are not sufficient for correct determination of snow load, especially for large-span and unique buildings and structures. The physical modelling methods used in practice also have a number of significant drawbacks. At the same time, the modern capabilities of CFD software and a large number of mathematical models of snow accumulation allows modelling snow loads numerically. Thus, the methodology presented in this paper allows calculating the snow load on the roofs of buildings and structures using steady and transient flows. Transient modelling makes it possible to observe the local growth of snow cover layer in time, but is very resource-intensive when calculating the snow load on the whole roof. These disadvantages are solved using steady flow, for which the equations of the snow accumulation model are solved for “large” times. The obtained snow deposition in combination with the building codes guidelines allow deriving the design shape coefficient μ for all roof zones. On the basis of the developed methodology on the basis of the A.B. Zolotov Research and Engineering Centre and the UNPL AAISC of the National Research Moscow State University of Civil Engineering a unified, complex methodology of snow load modelling is being developed, which combines the advantages of physical and numerical modelling. The “synthesis” of the two approaches allows studying the process of snow accumulation on the roofs of buildings and structures in the most comprehensive and versatile way.

Keywords: computational fluid dynamics, long-span roofs, numerical methods, numerical modelling, snow accumulation, snow transport, unique buildings and constructions

For citation. Britikov N.A., Belostotsky A.M. Numerical Modelling of Snow Loads. Features and Future of the Methodology. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2023, no. 3, pp. 149–153, doi: 10.22337/2077-9038-2023-3-149-153.

Расчёт снеговой нагрузки на покрытия зданий и сооружений нестандартной формы (причём не только уникальных, но и, например, большепролётных) зачастую предполагает отступление от рекомендаций строительных норм в части назначения коэффициента формы μ и использование экспериментальных методов для описания снегового покрова и определения возможного расположения локальных сугробов. В связи с тем, что снегонакопление – сложное, крайне нелинейное и многомасштабное явление, которое может моделироваться при помощи различных подходов в зависимости от конкретной задачи, разработка единой, верифицированной и апробированной методики его численного моделирования представляет собой нетривиальную задачу. Однако для большинства строительных задач основной интерес представляет снегоперенос, наибольший вклад в который (по данным [1], от 50% до 75%) вносит сальтация – перескакивание по покрытию частиц в широком размерном диапазоне. В связи с этим была разработана методика, позволяющая рассчитывать снегоперенос и снегонакопление путём численного моделирования сальтации, результаты которого могут быть использованы в сочетании с рекомендациями строительных норм и правил для определения расчётного коэффициента формы μ . Подробное изложение представленной методики приведено в [2]. Укажем здесь лишь основные её положения.

Моделирование снеговой нагрузки выполняется через расчёт обтекания исследуемого покрытия снеговетровым

поток с помощью уравнений Навье-Стокса (в данном случае – для несжимаемого газа), решаемых методом конечных объёмов, и использования полученных характеристик потока для вычисления высоты снегового покрова на покрытии. Для этого создаётся геометрическая модель здания или сооружения в окружающей застройке, на основе которой затем формируется конечнообъёмная сетка для численного решения уравнений. На основании проведённых ранее исследований [3–5] для моделирования сальтационного слоя снегопереноса используется модель уноса-отложения [6]. Результаты, полученные с её помощью на модельных задачах, показали достаточно хорошее согласование с результатами как натуральных наблюдений, так и физического (экспериментального) моделирования в аэродинамических трубах.

Методика позволяет решать задачу моделирования снеговой нагрузки в двух временных постановках – стационарной (для снеговетрового потока, осреднённого во времени) и нестационарной (для расчёта в физическом, или «реальном», времени) (рис. 1 и 2, соответственно). Первая постановка является менее ресурсоёмкой и более эффективной при использовании в инженерной практике: она позволяет достаточно быстро исследовать распределение снега по покрытию для разных направлений набегающего снеговетрового потока и на основании полученных результатов оценивать снегонакопление для заданной конфигурации кровли в целом. Вторая постановка требует высоких вычислительных

мощностей и длительного расчёта, поскольку изменение толщины снегового покрова (то есть перестроение расчётной сетки) происходит на каждом временном шаге, а для изучения снегонакопления во времени, приближённом к реальным условиям наблюдения (порядка часов) требуется большое число таких шагов, длина которых обычно составляет секунды или даже доли секунды из соображений стабильности вычислений. Тем не менее такой подход даёт возможность выявлять возникновение не очевидных из нормативных рекомендаций снеговых мешков, которые могут оказывать локальное действие на несущие конструкции. Также при таком подходе учитывается обратное действие изменения конфигурации кровли в силу роста снегового покрова на снеговую ветровую поток, поскольку учитывается и изменение характера обтекания покрытия ветром.

Рассчитанная численно толщина снегового покрова на покрытии выражается в обезразмеренном виде с помощью численно моделируемого коэффициента формы μ_{nm} . Вычисление его значений может проводиться двумя способами.

Во-первых, по определению, коэффициент можно вычислить как отношение толщины снегового покрова на покрытии (H_{roof} , м) к толщине покрова на таком участке земли, где влияние окружающей застройки на снеговую ветровую поток мало (H_{ground} , м):

$$\mu_{nm} = H_{roof} / H_{ground} \quad (1)$$

Такой способ накладывает определённые требования как на размер расчётной области, так и на количество учитыва-

емых зданий. Зачастую удовлетворение этим требованиям требует дополнительных расчётов, поскольку оценить поведение ветрового потока в данной конфигурации расчётной сетки заранее сложно. Альтернативным подходом является моделирование «пустой» расчётной области с изъятиями из неё зданием и застройкой, но с теми же характеристиками снеговую ветровую поток для наблюдения «невозмущённого» процесса снегонакопления.

Во-вторых, коэффициент может быть вычислен из балансного соотношения – предположения, согласно которому интегральное значение коэффициента на покрытии должно равняться единице (то есть снег перемещается в пределах покрытия, без ссыпания). В таком случае выражение для μ_{nm} примет вид:

$$\frac{1}{S} \iint_S \mu_{nm} dS = 1 \quad (2)$$

где S – площадь покрытия, м². Применение такого подхода позволяет не накладывать никаких дополнительных ограничений на расчётную область, однако само по себе является очередным упрощением вдобавок к уже принятым в разработанной методике, поскольку в действительности нанос и унос снега снеговую ветровую поток не обязательно в точности скомпенсированы. Впрочем, опыт практического применения такого подхода показывает, что для различных конфигураций кровли результаты, полученные с его помощью, достаточно достоверны.

Результаты верификации и апробации методики показали, что ввиду высокой стохастичности процесса снегонакопления и

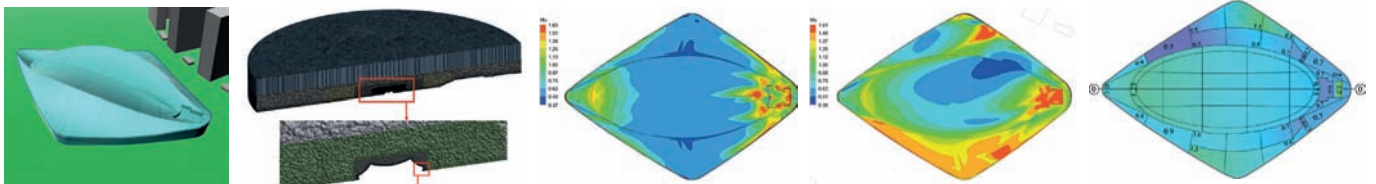


Рис. 1. Пример численного моделирования снеговой нагрузки на покрытие большепролётного здания в стационарной постановке: а) геометрическая модель; б) конечнообъёмная сетка (~ 9 млн ячеек); в) моделируемый коэффициент формы μ_{nm} без учёта окружающей застройки; г) моделируемый коэффициент формы μ_{nm} с учётом окружающей застройки; д) рекомендуемая схема расчётного коэффициента формы μ . Рисунки авторов статьи

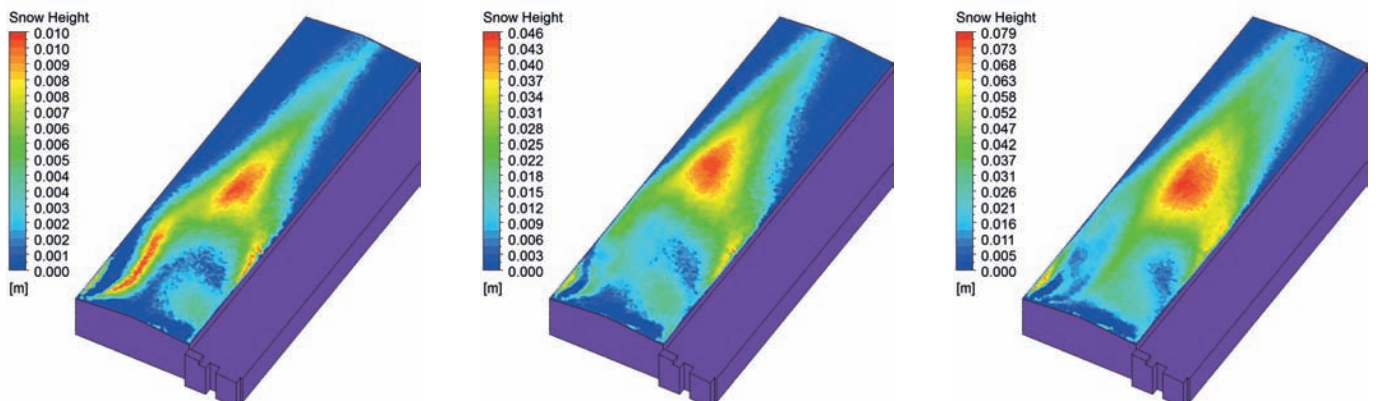


Рис. 2. Пример численного моделирования снеговой нагрузки на покрытие большепролётного здания в нестационарной постановке в различные моменты времени t : а) $t = 300$ с; б) $t = 1200$ с; в) $t = 2100$ с. Рисунки авторов статьи

его чувствительности к входным параметрам используемой модели, а также допущений, принятых в методике, использование только лишь распределений моделируемого коэффициента формы недостаточно для определения расчётного коэффициента формы μ . Статистический характер схем расчётного коэффициента формы, приведённых в нормативных документах, отвечает многократным (и более того – многолетним) наблюдениям реального снегонакопления в течение многих снегопадов с учётом ссыпания, таяния и замерзания снега. В этой связи с помощью моделирования (как физического, так и численного) можно понять, как происходит снегонакопление лишь в отдельных, частных случаях. Расчётный же коэффициент формы должен назначаться из соображений, согласующихся как с результатами расчётов, так и с требованиями строительных норм. При всём вышесказанном, применение моделирования позволяет выявить опасные с точки зрения механической безопасности здания зоны снегонакопления, которые не определены и не могут быть определены нормами для всего многообразия всевозможных конфигураций кровель. Синтез численного моделирования с нормативными документами позволяет получить картины наиболее достоверного распределения снега на покрытии и наилучшим образом рассчитать снеговую нагрузку.

Говоря о перспективах развития разработанной методики, можно выделить несколько направлений. На данном этапе с применением методики снегонакопление моделируется только за счёт наноса и перераспределения снежной массы по покрытию. В реальности на снегонакопление помимо ветрового потока влияют тепловая энергия и гравитация, под действием которых снеговой покров подтаивает, намерзает и ссыпается с кровли. Образование наледей также оказывает влияние на снегоперенос, поскольку они препятствуют уносу снега, в то время как ссыпание под действием собственного веса уменьшает снеговую нагрузку у краёв покрытия. Также на краях возможно свисание снега, описываемое схемой 6.3 раздела 1-3 Еврокода ¹ (рис. 3), который также может намерзать и препятствовать ссыпанию. «Единая» методика моделирования снегонакопления должна учитывать перечисленные явления.

Другим важным направлением развития методики является оптимизация моделирования в нестационарной

¹ <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.3.2003.pdf>

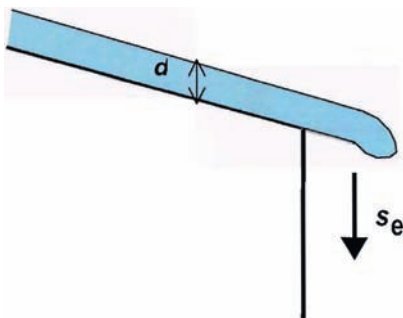


Рис. 3. Учёт местной нагрузки от снега, свисающего с карниза крыши (источник: схема 6.3 раздела 1-3 Еврокода 1)

постановке для проведения многовариантных расчётов с изменением направления набегающего снеговетрового потока. В настоящее время применение методики в нестационарной постановке на инженерной практике затруднено высокими требованиями к вычислительным мощностям и длительными сроками проведения работ. Тем не менее результаты, получаемые с её помощью, могут иметь важное значение для учёта локальных неравномерностей распределения снега по покрытию. Среди наиболее очевидных решений, которые возможно использовать для уменьшения ресурсоёмкости вычислений, можно выделить выборочную дискретизацию расчётной области, подмоделирование вблизи исследуемого покрытия, использование более современных моделей турбулентности.

Первый способ, хотя и является наиболее простым и широко применимым для уменьшения ресурсоёмкости задач вычислительной аэрогидродинамики, чреват дестабилизацией численного решения. Так, при резком увеличении размеров конечнообъёмных ячеек происходит потеря детальной информации о воздушном домене, полученная из ячеек меньшего размера, что может привести к расхождению уравнений. Более того, достаточная детализация сетки необходима для сохранения профиля набегающего потока на всём протяжении от входа расчётной области до исследуемого объекта. Второй способ позволяет использовать неконформные сетки разных размеров, соединённые интерфейсом, и выполнять перестроение только в ограниченном, заранее определённом пространстве, а не во всей расчётной области. При этом возникает необходимость использовать связный решатель для согласования расчётов внутри двух расчётных областей, что, возможно, не потребует увеличения вычислительных мощностей, но увеличит время расчёта за счёт задержки передачи информации внутри решателя. Последний способ представляет особый интерес, поскольку сейчас активно развиваются «гибридные» модели, сочетающие преимущества RANS-подхода в вязком слое и LES-подхода вдали от пристеночной области. Так, относительно недавно в программном комплексе ANSYS Fluent стали доступны модели SBES и SDDES, значительно усовершенствованные по сравнению с более старыми представителями DES-семейства. Исследования на модельных задачах показывают существенный прирост производительности нестационарных расчётов по сравнению с традиционным LES-подходом и более высокую точность по сравнению с URANS-подходом. Использование таких моделей для численного моделирования снегонакопления в нестационарной постановке также может серьёзно облегчить расчёты.

Наконец, третьим актуальным направлением развития является разработка комплексной методики расчёта снегонакопления с использованием как численного, так и экспериментального моделирования (в аэродинамической трубе). Подобный путь позволяет как воспользоваться преимуществами обоих подходов, так и компенсировать их недостатки в тех областях, которые пока ещё слабо разработаны или требуют доработки. Подобная методология моделирования снеговых

нагрузок в настоящее время прорабатывается на базе НОЦ КМ им. А.Б. Золотова и УНПЛ ААИСК НИУ МГСУ на основе описанной в этой статье методики. Синтез двух подходов с опорой на рекомендации нормативных документов позволяет наиболее эффективно изучить процесс снегонакопления на покрытиях зданий и сооружений.

Список источников

1. Snow Particle Characteristics in the Saltation Layer / C. Gromke, S. Horender, B. Walter, M. Lehning. – Текст : электронный // *Journal of Glaciology*. – 2014. – Т. 60. – № 221. – С. 431–439. – URL: https://www.researchgate.net/publication/262990347_Snow_particle_characteristics_in_the_saltation_layer (дата обращения 28.08.2023).

2. Britikov N.A. Numerical Modelling of Snow Deposits and Snow Transport on Long-Span Roofs for Steady and Unsteady Flow / N.A. Britikov. – Текст : непосредственный // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2022. – Т. 18, № 4. – С. 23–38.

3. Belostotsky, A.M. Comparison of Determination of Snow Loads for Roofs in Building Codes of Various Countries / A.M. Belostotsky, N.A. Britikov, O.S. Goryachevsky. – Текст : непосредственный // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 39–47.

4. Belostotsky, A.M. Critical Review of Modern Numerical Modelling of Snow Accumulation on Roofs with Arbitrary Geometry / A.M. Belostotsky, O.S. Goryachevsky, N.A. Britikov. – Текст : непосредственный // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2021. – Т. 17, № 4. – С. 40–59.

5. Belostotsky, A.M. Critical Review of Physical Modelling of Snow Accumulation on Roofs with Arbitrary Geometry / A.M. Belostotsky, O.S. Goryachevsky, N.A. Britikov. – Текст : непосредственный // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2021. – Т. 17, № 4. – С. 22–39.

6. Naaim, M. Numerical Simulation of Drifting Snow: Erosion and dEposition Models / M. Naaim, F. Naaim-Bouvet, H. Martinez. – Текст : электронный // *Annals of Glaciology*. – 1998. – Vol. 26. – P. 191–196. – URL: https://www.researchgate.net/publication/319962289_Numerical_simulation_of_drifting_snow_erosion_and_deposition_models (дата обращения 28.08.2023).

7. An Overview of Hybrid RANS–LES Models Developed for Industrial CFD / F. Menter, A. Hüppe, A. Matyushenko, D.

Kolmogorov. – Текст : электронный // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. – №. 6. – P. 2459. – URL: https://www.researchgate.net/publication/349978109_An_Overview_of_Hybrid_RANS-LES_Models_Developed_for_Industrial_CFD (дата обращения 28.08.2023).

References

1. Gromke C., Horender, S., Walter, B., & Lehning, M. Snow Particle Characteristics in the Saltation Layer. In: *Journal of Glaciology*, 2014, no. 60 (221), pp. 431–439. URL: https://www.researchgate.net/publication/262990347_Snow_particle_characteristics_in_the_saltation_layer (Accessed 08/28/2023). (In Engl.)

2. Britikov N.A. Numerical Modelling of Snow Deposits and Snow Transport on Long-Span Roofs for Steady and Unsteady Flow. In: *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2022, no. 18 (4), pp. 23–38. (In Engl., abstr. in Russ.)

3. Belostotsky A. M., Britikov, N. A., & Goryachevsky, O. S. Comparison of Determination of Snow Loads for Roofs in Building Codes of Various Countries. In: *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2021, no. 17 (3), pp. 39–47. (In Engl., abstr. in Russ.)

4. Belostotsky A. M., Britikov N. A., Goryachevsky O. S. Critical Review of Modern Numerical Modelling of Snow Accumulation on Roofs with Arbitrary Geometry. In: *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2021, no. 17 (4), pp. 40–59. (In Engl., abstr. in Russ.)

5. Belostotsky A. M., Goryachevsky O. S., Britikov N. A. Critical Review of Physical Modelling of Snow Accumulation on Roofs with Arbitrary Geometry. In: *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2021, no. 17 (4), pp. 22–39. (In Engl., abstr. in Russ.)

6. Naaim M., Naaim-Bouvet F., Martinez H. Numerical Simulation of Drifting Snow: Erosion and Deposition Models. In: *Annals of Glaciology*, 1998, no. 26, pp. 191–196. URL: https://www.researchgate.net/publication/319962289_Numerical_simulation_of_drifting_snow_erosion_and_deposition_models (Accessed 08/28/2023). (In Engl.)

7. Menter F, Hüppe A, Matyushenko A, Kolmogorov D. An overview of Hybrid RANS–LES models developed for industrial CFD. In: *Applied Sciences*, 2021, no. 11 (6), p. 2459. URL: https://www.researchgate.net/publication/349978109_An_Overview_of_Hybrid_RANS-LES_Models_Developed_for_Industrial_CFD (Accessed 08/28/2023). (In Engl.)