

На правах рукописи



**Бритиков Никита Александрович**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЕГОВЫХ НАГРУЗОК  
НА ПОКРЫТИЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
академик РААСН,  
**Белостоцкий Александр Михайлович**

Официальные оппоненты: **Пшеничкина Валерия Александровна**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Волгоградский государственный технический  
университет», кафедра строительных  
конструкций, оснований и надежности  
сооружений, заведующий кафедрой

**Лебедева Ирина Владимировна**  
кандидат технических наук,  
АО Научно-исследовательский центр  
«Строительство» – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко,  
лаборатория надежности сооружений,  
заведующий лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**

Защита состоится 28 февраля 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 125315, Москва, ул. Часовая, д.22/2, стр. 1, ауд. 329.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), rut-miit.ru.

Автореферат разослан «\_\_» января 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Артюшенко Игорь Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Снеговая нагрузка относится к климатическим и является одним из основных воздействий, которым подвергаются несущие конструкции большепролетных зданий и сооружений. Формирование снеговой нагрузки на покрытии зданий и сооружений – снегонакопление – происходит под действием ветровых потоков с учетом конфигурации кровли. Это комплексный процесс, сложность которого обусловлена разными масштабами входящих в него подпроцессов (в особенности, снегопереноса), их высокой нелинейностью и сильной связанностью. Одной из основных отраслей, требующих предельно точного учета снегонакопления, является строительство большепролетных зданий и сооружений. Действующие теоретические положения не в полной мере отражают действительное расположение и величину снеговой нагрузки на их покрытия, в первую очередь потому, что в рекомендациях нормативных документов приводятся распределения снегоотложений только для типовых форм покрытий. Также на большой площади таких покрытий могут образовываться локальные снеговые мешки, которые невозможно учесть нормами. Поэтому каждое такое здание или сооружение требует индивидуального моделирования снеговой нагрузки. Для этого нормами предусмотрена возможность моделирования снегоотложений – как правило, физического (экспериментального). Однако его известные недостатки (применение снегоимитаторов, невозможность полного выполнения условий подобия, контроля над всеми условиями проведения эксперимента и др.) вынуждает ученых и инженеров обращаться к математическим (численным) методам, и некоторые нормативные документы это допускают (например, Eurocode). При всем вышесказанном, и несмотря на повышенный запрос в отрасли, за последние десятилетия так и не было создано единой, верифицированной, валидированной и эффективной математической (численной) методики моделирования снегонакопления в общем и снегопереноса в частности, которую можно было бы включить в нормативные документы. Таким образом, исследование снегоотложений на сложных кровлях, особенно для большепролетных зданий и сооружений, с учетом особенностей характеристик снеговетрового потока и геометрических параметров кровли является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Моделирование снегоотложений и снегопереноса является гибридной задачей разных ветвей физики и математики, преимущественно относящейся к динамике жидкости и газа. Рассмотрение ее положений и взаимосвязи с другими ветвями гидрогазодинамики как в научно-историческом контексте, так и с точки зрения методологии происходит преимущественно в научно-исследовательских статьях. Ключевыми считаются работы Т. Уэматсу (T. Uematsu), М. Меллора (M. Mellor), Д.У. Помероя (J.W. Pomeroy) и Д.М. Грея (D.M. Gray), Г.Э. Листона (G.E. Liston), М. Нэима, Ф. Нэим-Буве и У. Мартинеза (M. Naaim, F. Naaim-Bouvet, H. Martinez). К важнейшим работам по данной теме относятся исследования по моделированию физики песка, из которых к фундаментальным относятся руководство Р.А. Бэгнолда (R.A. Bagnold), среди авторов знаковых работ – Р.С. Андерсон и П.К. Хафф (R.S. Anderson, P.K. Haff). В настоящее время активно занимаются моделированием снегопереноса и снегоотложений Т.К. Тиис (T.K. Thiis), Й. Томинага (Y. Tominaga), Т. Оказе (T. Okaze), А. Мошида (A. Mochida), В. Ма (W. Ma), С. Чжоу (X. Zhou).

**Цели и задачи исследования.** Целью исследования является разработка методики численного моделирования снегоотложений и снеготранспорта для расчета снеговой нагрузки на покрытия большепролетных зданий и сооружений.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Выполнить анализ теории расчета снеговой нагрузки на большепролетные покрытия зданий и сооружений и выявить возможность применения элементов теории вычислительной аэрогидродинамики для расчета характеристик снеговетрового потока.
2. Выявить теоретические особенности процесса снеготранспорта и формирования снегоотложений с учетом геометрических параметров покрытия и характеристик снеговетрового потока и влияние временного фактора на формирование снегоотложений на большепролетных покрытиях зданий и сооружений.
3. Разработать методику численного моделирования снеготранспорта и снеготранспорта с учетом геометрии покрытия и характеристик снеговетрового потока и реализовать ее в программном комплексе численного расчета задач динамики жидкости и газа.
4. Калибровать параметры модели, применяемой в методике, на ряде тестовых задач, имеющих аналитическое, экспериментальное или альтернативное численное решение.
5. Верифицировать методику экспериментальными и численными результатами.
6. Апробировать уточненную методику на реальных объектах, с предоставлением результатов и рекомендаций по расчету подобных объектов.
7. Разработать рекомендации по расчету снеговых нагрузок на большепролетные здания и сооружения с использованием численного моделирования снеготранспорта и снеготранспорта.

**Объект исследования.** Численное моделирование снеготранспорта и снеготранспорта в стационарной и нестационарной постановке с применением однофазного и многофазного потока.

**Предмет исследования.** Методы вычислительной аэродинамики, модели снеготранспорта и снеготранспорта, особенности их применения: различия в подходе к моделированию, принимаемые авторами допущения и их влияние на точность результатов, возможность применения различных постановок (стационарной и нестационарной) для моделирования многофазного потока.

**Научная новизна.** Новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем:

1. Доказана применимость уравнений модели уноса-отложения для моделирования снеготранспорта и снеготранспорта на большепролетных покрытиях зданий и сооружений.
2. Показано, что в общем для расчета снеготранспорта на большепролетных покрытиях зданий и сооружений достаточно моделировать только сальтационный слой снеготранспорта.
3. Сформулирована и обоснована гипотеза о независимости потока массотранспорта снега от времени для моделирования снеготранспорта и снеготранспорта на большепролетных покрытиях зданий и сооружений с помощью аэродинамического расчета в стационарной постановке.
4. Обоснована возможность использования модели турбулентности Generalized  $k-\omega$

(ГЕКО) для моделирования снегонакопления и снегопереноса на большепролетных покрытиях зданий и сооружений в стационарной постановке.

5. Разработан алгоритм численного моделирования снегонакопления и снегопереноса с учетом геометрии покрытия и характеристик снеговетрового потока.

6. Разработаны рекомендации по выполнению численного моделирования снегонакопления и снегопереноса на большепролетных покрытиях зданий и сооружений с использованием разработанной методики.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в следующем:

1. Разработана методика численного моделирования снегонакопления и снегопереноса в стационарной и нестационарной постановке с применением однофазного и многофазного ветрового потока для большепролетных зданий и сооружений.

2. Разработан комплекс программ и алгоритмов для реализации вышеуказанной методики, которые в совокупности могут стать одной из составных частей программных комплексов конечнообъемного и конечноэлементного анализа напряженно-деформированного состояния зданий и сооружений.

3. Результаты численного моделирования снегонакопления и снегопереноса, полученные с использованием методики, позволяют повысить безопасность и надежность зданий и сооружений за счет точного расчета снеговой нагрузки.

4. Результаты работы ориентированы на использование в практике проектных и научно-исследовательских организаций, занимающихся математическим (численным) и физическим (экспериментальным) моделированием значимых стадий жизненного цикла зданий и сооружений (проектирование, строительство, эксплуатация и др.).

**Методология и методы исследования.** Теоретическое основание составляют фундаментальные научные работы исследователей физики и свойств снега, специалистов по численному моделированию снегопереноса и снегоотложений, научно-исследовательские статьи по теме. Методологическое основание исследования составляют принцип всестороннего анализа предмета исследования, восхождения от абстрактного к конкретному, диалектический, исторический, логический методы. Используются современные достижения прикладной математики в области численных методов решения задач вычислительной аэрогидродинамики в различных постановках. Реализация авторской методики и алгоритмов проводится на языках программирования C/C++, Perl, Python, Scheme. Для выполнения расчетных исследований и апробации численной методики используется программный комплекс ANSYS Fluent, реализующий численные методы решения задач в различных постановках.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная, верифицированная и апробированная методика численного моделирования снегонакопления и снегопереноса в стационарной и нестационарной постановке с применением однофазного и многофазного потока.

2. Результаты основных верификационных задач, на которых проверялась разработанная методика.

3. Результаты математического (численного) моделирования снегонакопления и снегопереноса на покрытиях реальных большепролетных зданий с дальнейшим анализом полученных результатов.

4. Рекомендации по выполнению математического (численного) моделирования

снегонакопления и снегопереноса, полученные после анализа результатов апробации разработанной методики.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов работы обеспечена:

1. Строгостью используемого математического аппарата и корректности постановок задач в рамках теоретических предпосылок строительной механики и механики жидкости и газа.

2. Согласованностью полученных результатов численного моделирования верификационных примеров с экспериментальными данными, аналитическими и численно-аналитическими решениями.

Результаты диссертации использованы в научно-исследовательских работах АО «Научно-исследовательский центр СтаДиО», НОЦ КМ им. А.Б. Золотова и УНПЛ ААИСК НИУ МГСУ.

Апробация разработанной методики проводилась при расчете проектируемых большепролетных и уникальных зданий и сооружений – цеха №104 объекта «Центр строительства крупнотоннажных морских сооружений (ЦСКМС)»; Главного корпуса Подмосковского образовательного молодежного центра «Мастерская управления “Сенеж”» («Агора»); Серфинг-парка «Волна».

Результаты расчетных исследований докладывались и обсуждались на ряде вузовских, всероссийских и международных конференций:

– V Всероссийская конференция с международным участием «Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки», г. Москва, 20-23 ноября 2019 г.

– Научно-дискуссионный семинар «Научно-техническое сопровождение проектирования строительных объектов повышенного уровня ответственности. Защита проектной документации в государственной экспертизе. Методология и разбор реальных объектов и задач из опыта НИЦ СтаДиО: требования, практика, рекомендации, обсуждение», г. Москва, 5 декабря 2019 г.

– Научно-дискуссионный семинар «Научно-техническое сопровождение ответственных объектов на этапе проектирования и последующих этапах их жизненного цикла. Математическое моделирование в основе систем мониторинга состояния сооружений. Методология и разбор реальных объектов и задач: требования, практика, рекомендации, обсуждение», г. Москва, 25-29 мая 2020 г.

– IX Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»), г. Москва, 25-26 августа 2021 г.

– X Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»), г. Москва, 29-30 сентября 2022 г.

– VIII Международный симпозиум РААСН «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», г. Тамбов, 17-21 мая 2023 г.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (171 наименование, в том числе 102 на иностранных языках), 74 рисунка и 17 таблиц. Объем диссертации 150 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проблемы численного моделирования снеговых нагрузок на большепролетные здания и сооружения, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна, достоверность и обоснованность научных положений, теоретическая и практическая значимость работы, представлена реализация результатов исследования и апробация диссертационной работы.

В **первой главе** выполнен обзор современного состояния вопроса. Проведен обзор как «классических», так и современных «альтернативных» методов математического моделирования снегопереноса и снегоотложений по отечественным и зарубежным научным публикациям и нормативным документам. Рассмотрены границы применимости этих методов, экспериментальные данные, на основании которых они калибровались и верифицировались. Было установлено, что, учитывая опыт мирового научного и инженерного сообщества и разнообразие подходов к математическому моделированию в области определения снеговых нагрузок на покрытия зданий и сооружений, а также сложность предмета моделирования, которым это разнообразие и продиктовано, невозможно охватить весь спектр расчетных случаев и ситуаций с помощью ограниченного набора простых схем из СП и экспериментальных методов. Сделан вывод о том, что применение современных методов математического моделирования в совокупности с остальными методами является необходимым условием для создания современных и гибких норм, которые позволили бы решать задачи проектирования гораздо более разнообразной сложности, чем это возможно на сегодняшний день.

**Вторая глава** посвящена разработке и описанию методики численного моделирования снегонакопления и снегопереноса для расчета снеговых нагрузок на большепролетные здания и сооружения в стационарной и нестационарной постановках.

В основе методики лежит модель уноса-отложения, основным предположением которой является то, что унос снежной массы происходит под действием аэродинамических сил, а осадение – в результате оседания и закрепления частиц снега, приносимых ветровым потоком. Изменение высоты снежного покрова во времени описывается выражением:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{q_g}{\gamma}, \quad (1)$$

где  $h$  [м] – высота снежного покрова,  $t$  [с] – время,  $\gamma$  [кг/м<sup>3</sup>] – насыпная плотность снега.

Поток обмена массой между воздухом и снеговым покровом  $q_g$  имеет вид:

$$q_g = q_+ - q_- \quad (2)$$

$$q_+ = C w_f \left( 1 - \frac{u_*^2}{u_t^2} \right) \quad (3)$$

$$q_- = A \rho_a (u_*^2 - u_t^2), \quad (4)$$

где  $q_+$  [кг/м<sup>2</sup>с] – поток отложения,  $q_-$  [кг/м<sup>2</sup>с] – поток уноса,  $C$  [кг/м<sup>3</sup>] – концентрация снега в воздухе вблизи поверхности снегонакопления,  $w_f$  [м/с] – средняя скорость оседания снега,  $A$  [с/м] – коэффициент, зависящий от степени когезии (межчастичного связывания),  $\rho_a$  [кг/м<sup>3</sup>] – плотность воздуха,  $u_*$  [м/с] – скорость трения,  $u_t$  [м/с] – пороговая скорость трения. Скорость трения рассчитывается по формуле  $u_* = \sqrt{\tau_w / \rho_a}$ , где локальное

напряжение сдвига  $\tau_w$  вычисляется с помощью численного моделирования обтекания воздуха по рассматриваемому покрытию. Пороговая скорость трения определяется экспериментально.

Структурная схема разработанной **численной методики в нестационарной постановке** имеет вид:

- 1. Анализ объекта** (анализ климатических характеристик в месте расположения объекта, выявление зон возможного скопления снега и зон снегопереноса);
- 2. Постановка задачи** (выбор направлений и скоростей ветра, уточнение характеристик потока для каждой фазы (концентрация снега, скорость трения и т.д.));
- 3. Создание вычислительной модели** (создание геометрической модели расчетной области и расчетной сетки, учитывающей точки интереса объекта);
- 4. Выбор и настройка модели турбулентности** (в том числе из соображений оптимизации вычислений);
- 5. Определение параметров расчета** (начальные и граничные условия, размер шага по времени, численные схемы и решатели);
- 6. Аэродинамический расчет** (в нестационарной постановке, с применением пользовательского кода для вычисления изменения высоты снежного покрова);
- 7. Инженерный анализ результатов расчета.**

Учитывая высокие требования для использования нестационарной методики к качеству расчетной сетки и достаточно маленькому временному шагу, расчеты подобного рода должны будут обладать очень высокой ресурсоемкостью. По этим причинам модель уноса-отложения была дополнена *гипотезой стационарности*, согласно которой поток  $q_g$  и входящие в него параметры *не зависят от времени*.

Тогда, интегрируя уравнение (1), получим:

$$\int_0^H dh = \frac{1}{\gamma} \int_0^T q_g dt \Leftrightarrow H = \frac{T}{\gamma} q_g \quad (5)$$

где  $H$  [м] – полученная высота снегового покрова,  $T$  [с] – наблюдаемый период снегонакопления.

Введем отдельные наблюдаемые периоды для уноса ( $T_-$ ) и отложения ( $T_+$ ) снега:

$$H = \frac{q_+ T_+ - q_- T_-}{\gamma} \quad (6)$$

Варьированием наблюдаемых периодов времени  $T_+$  и  $T_-$  и скоростного режима обдува получают различные распределения высоты снегового покрова  $H$  по поверхности покрытия с целью поиска наиболее неблагоприятных из соображений механической безопасности здания или сооружения.

Для моделирования турбулентности используется обобщенная  $k-\omega$  модель (Generalized  $k-\omega$ , GEKO). Путем калибровки свободных коэффициентов она может быть настроена для корректного моделирования обтекания конкретных зданий или сооружений и более точно предсказывать течение в пограничном слое, что особенно важно для определения напряжения сдвига и, соответственно, скорости трения. В случае большепролетных зданий и сооружений, было обнаружено, что оптимальным является минимальное значение коэффициента  $C_{SEP} = 0.7$ , либо близкое к нему  $C_{SEP} = 1.0$ .

Таким образом, структурная схема разработанной численной методики в

стационарной постановке приобретает вид:

**1. Анализ объекта** (анализ климатических характеристик в месте расположения объекта, выявление зон возможного скопления снега и зон снегопереноса);

**2. Постановка задачи** (выбор направлений и скоростей ветра, уточнение характеристик потока (скорость трения и т.д.));

**3. Создание вычислительной модели** (создание геометрической модели расчетной области и расчетной сетки, учитывающей точки интереса объекта);

**4. Настройка модели турбулентности** (калибровка коэффициентов GEKO для корректного моделирования обтекания конкретного здания или сооружения);

**5. Определение параметров расчета** (начальные и граничные условия, размер шага по времени, численные схемы и решатели);

**6. Аэродинамический расчет** (в стационарной постановке, с применением модели-уноса отложения, модифицированной гипотезами 1 и 2);

**7. Инженерный анализ результатов расчета** (получения расчетного коэффициента формы  $\mu$  путем синтеза результатов математического (численного) моделирования и рекомендаций строительных норм).

Для обезразмеренного описания толщины снегового покрова, полученной с применением методики, введем понятие *численно моделируемого коэффициента формы*  $\mu_{nm}$  и проведем важное различие между ним и *расчетным коэффициентом формы*  $\mu$ , представленным в нормативных документах и применяемым при обосновании механической безопасности. Статистический характер схем расчетного коэффициента формы отвечает многократным (и многолетним) наблюдениям реального снегонакопления в течение многих снегопадов с учетом ссыпания, таяния и замерзания снега. В этой связи с помощью моделирования (как физического, так и численного) возможно понять, как происходит снегонакопление лишь в отдельных, частных случаях. Расчетный же коэффициент формы должен назначаться из соображений, согласующихся как с результатами вычислений, так и с требованиями строительных норм.

Вычисление значений коэффициента  $\mu_{nm}$  может проводиться одним из двух способов. Во-первых, по определению, коэффициент формы выражается через отношение толщины снегового покрова на покрытии ( $H_{roof}$  [М]) к толщине покрова на таком участке земли, где влияние окружающей застройки на снеговетровой поток мало ( $H_{ground}$  [М]):

$$\mu_{nm} = H_{roof}/H_{ground} \quad (7)$$

Такой способ является более «физичным» и приближенным к экспериментальным методам расчета коэффициента формы, однако существенно зависит от выбора участка, на котором происходит измерение  $H_{ground}$ . В случае математического (численного) моделирования это означает расчет либо в достаточно большой области, в которой на удалении от исследуемого объекта возможно получить «невозмущенный» процесс снегонакопления (некоторое постоянное значение напряжения сдвига), либо в пустой расчетной области, т.е. объеме воздуха, из которого изъят исследуемый объект. В качестве альтернативы расчетному значению высоты снегового покрова на поверхности возможно вычислить его среднее значение из нормативной величины веса снегового покрова  $S_g$  по формуле:

$$H_{ground}^{norm} = \frac{S_g}{\rho g} \quad (8)$$

Однако рассчитанная таким образом высота снегового покрова не обязательно соответствует снегонакоплению при данных начальных условиях и может давать как завышенные, так и заниженные значения коэффициента формы.

Во-вторых, коэффициент формы может быть вычислен из *балансного соотношения* – предположения, согласно которому интегральное значение коэффициента на покрытии должно равняться единице. В таком случае выражение для  $\mu_{nm}$  примет вид:

$$\frac{1}{S} \iint_S \mu_{nm} dS = 1, \quad (9)$$

где  $S$  [м<sup>2</sup>] – площадь покрытия. Такой подход позволяет получать менее экстремальные значения коэффициента, потому что предполагает изначально равномерное распределение снега по покрытию, но является упрощенным, поскольку в действительности нанос и унос снега снеговетровым потоком не всегда полностью скомпенсированы. При этом такой подход дает возможность не накладывать дополнительных ограничений на расчетную область. Для большого класса конфигураций кровли результаты, полученные с его помощью, достаточно достоверны.

Предположим, что на покрытии изначально имеется некоторое количество равномерно распределенного снега  $\mu_0 = const$ . Тогда высота снегового покрова на покрытии  $H$ , вычисляемая по формуле (6), может быть выражена в виде:

$$H = \frac{(\mu_{nm} - \mu_0)S_g}{\gamma}, \quad (10)$$

где  $S_g$  [кг/м<sup>2</sup>] – нормативное значение веса снегового покрова. Перепишем формулу (10) с учетом (6) и получим:

$$\mu_{nm} = \mu_0 + \frac{q_+ T_+ - q_- T_-}{S_g}. \quad (11)$$

Выбор между формулами (7) и (11) следует делать в пользу наиболее неблагоприятного распределения значений математически моделируемого коэффициента формы по покрытию. Значение  $\mu_0$  подбирается итерационно из условия (9).

В результате компаративного анализа нормативных документов различных стран, представленного в первой главе, были выявлены основные статистические закономерности распределения снеговой нагрузки по типичным формам покрытий (примитивам). При назначении расчетного коэффициента формы с использованием результатов численного моделирования, рассматриваемое покрытие должно быть предварительно аппроксимировано одним или несколькими примитивами. Для сложных конфигураций кровли покрытие необходимо разбить на отдельные участки и аппроксимировать примитивами их. При этом разбиение должно проводиться с учетом расположения несущих конструкций покрытия (балок, ферм, канатов и пр.). Снеговая нагрузка в пределах этих участков должна иметь следующий характер (рисунок 1):

- а) кусочно-постоянный – для плоских и скатных, висячих цилиндрической формы;
- б) линейный – для двух- и многопролетных скатных, сводчатых и близких к ним по очертанию (при  $f/l > 0.1$ ), у перепада высоты (рисунок 2);
- в) синусоидальный – для однопролетных сводчатых и близких к ним по очертанию, купольных круговых и близких к ним по очертанию.

При назначении расчетного коэффициента формы следует учитывать, что в

различных нормативных документах могут содержаться разные указания о допустимых пределах значения расчетного коэффициента формы для данного примитива, равно как и дополнительные схемы распределения расчетного коэффициента формы как для данного примитива, так и для не представленных на рисунке 1.

Величину снеговой нагрузки у перепадов высоты  $\mu_h$  следует вычислять с учетом распределения снега на верхнем ( $\mu_{nm,u}$ ) и нижнем ( $\mu_{nm,l}$ ) покрытии, полученном по результатам моделирования (рисунок 2). Значение снеговой нагрузки на покрытие возле парапетов  $\mu_p$  следует вычислять с учетом численно моделируемого коэффициента формы  $\mu_{nm}$  в соответствии с рисунком 3.

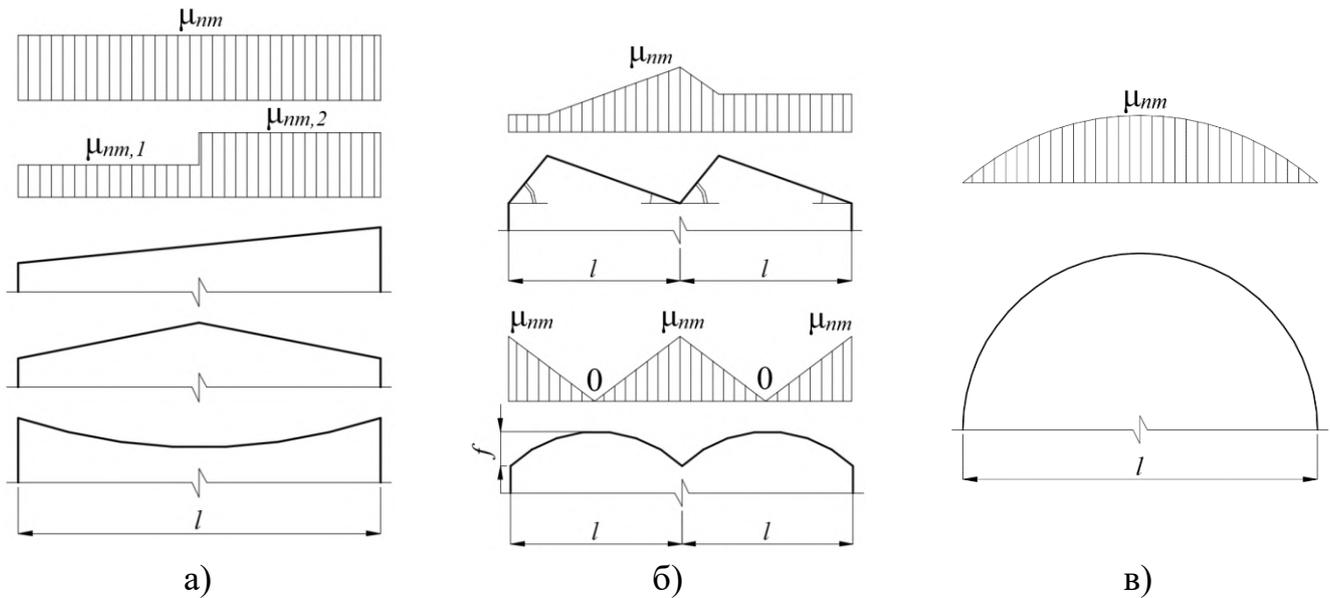


Рисунок 1 – Основные закономерности распределения снеговой нагрузки по типичным формам покрытий (примитивам)

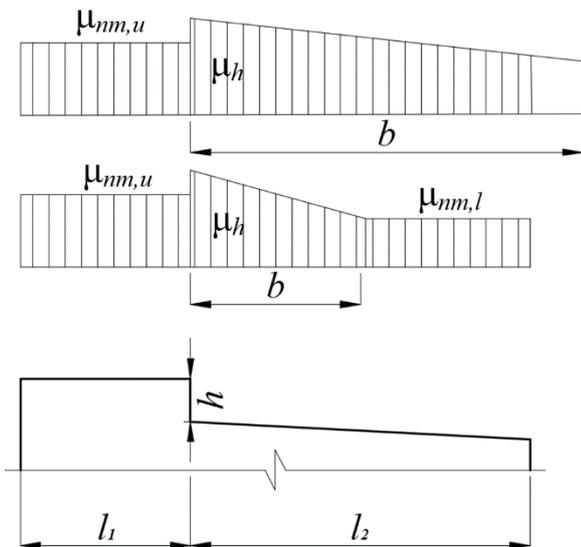


Рисунок 2 – Снеговая нагрузка у перепада высот с учетом результатов моделирования

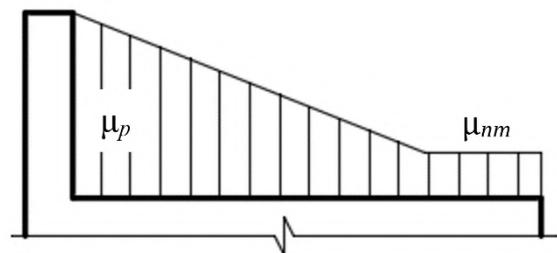


Рисунок 3 – Снеговая нагрузка у парапета с учетом результатов моделирования

Если же для покрытия исследуемого объекта необходимо рассмотреть случай снеговой нагрузки, не отраженный в данных нормах (например, СП 20.13330.2016), то допускается использовать данные нормативных документов других стран, в которых такой случай рассмотрен. В частности, к таким случаям относятся нагрузка от снега, свисающего с карниза (п. 6.3 Еврокода EN 1991-1-3) и нагрузка на трубы и кабель-каналы (п. 7.13.3

ASCE 7-22).

В случае если для исследуемого объекта доступны результаты как численного (математического), так и физического (экспериментального) моделирования, в сочетании с рекомендациями норм необходимо использовать данные обоих подходов. Совместное использование подходов позволяет во многом компенсировать недостатки численного и физического моделирования и, на данный момент, наиболее полно описать распределение снега по покрытию.

**Третья глава** диссертационного исследования посвящена верификации разработанной методики. В качестве верификационных были выбраны две задачи.

*Первая задача* – модельная (обтекание отдельно стоящего куба), для которой накопление снега исследуется качественно, с образованием характерных структур (наветренный и подветренный сугробы и подковообразный след).

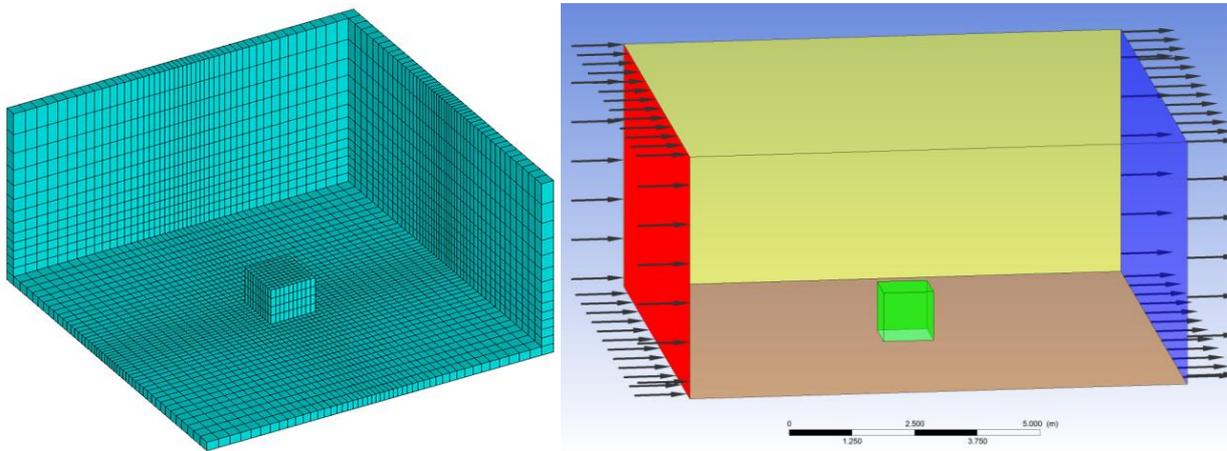


Рисунок 4 – Внешний слой расчетной сетки и схема аэродинамического домена

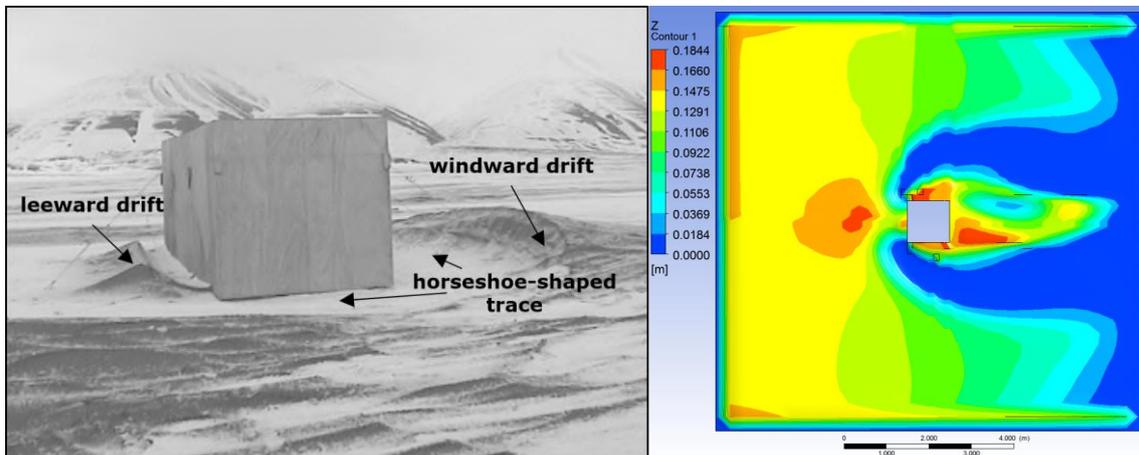


Рисунок 5 – Характерные сугробы с наветренной и подветренной сторон сооружения во время натурального эксперимента и рассчитанные снегоотложения в момент времени  $t = 1$  ч

С применением методики в нестационарной постановке в прямоугольной расчетной области размером  $10 \times 10 \times 5$  м моделировалось обтекание куба размером  $1 \times 1 \times 1$  м двухфазным потоком в эйлеровой постановке (воздух + частицы снега) с логарифмическим профилем скорости на входе в течение 60 мин с шагом по времени 1 с. Плотность снежной фазы принята равной  $150 \text{ кг/м}^3$ . Аэродинамическая область (рисунок 4, справа) формируется из конечно-объемной сетки (рисунок 4, слева). По результатам серии дополнительных расчетов в стационарной постановке начальное значение объемной доли

снега на входе и начальная скорость трения были приняты равными  $1 \cdot 10^{-4}\%$  и 0.3 м/с, соответственно. Для моделирования турбулентности использовалась Realizable  $k$ - $\epsilon$  модель.

Рассчитанное снегонакопление (рисунок 5, справа) в целом согласуется с данными натурных наблюдений (рисунок 5, слева): так, визуализируются два характерных сугроба с наветренной и подветренной сторон и подковообразный след от потока уноса. Результаты показывают, что применение модели уноса-отложения для сальтации достаточно для создания сугробов характерной формы и моделирования переноса снега. Также демонстрируют стохастичность накопления снега и ресурсоемкость моделирования, поскольку для адекватной сходимости задачи требуется очень маленький временной шаг.

С применением методики в стационарной постановке в аналогичной расчетной области (рисунок 4) моделировалось обтекание куба размером  $1 \times 1 \times 1$  м однофазным потоком с логарифмическим профилем скорости на входе в течение 150 итераций. Для моделирования турбулентности использовалась Realizable  $k$ - $\epsilon$  модель.

Рассчитанное снегонакопление (рисунок 6, слева) в целом согласуется как с данными натурных наблюдений, так и с результатами численного моделирования в нестационарной постановке. Как и в нестационарной постановке, наблюдается подковообразный след от потока уноса и характерные сугробы с подветренной стороны и вокруг куба. Сугроб с наветренной стороны объединен с полосой равномерно распределенного снегового покрова максимальной высоты. Такой результат возможно объяснить распределением скорости трения в расчетной области (зона  $u_t = 0.004 \div 0.009$  м/с на рисунке 6, справа). В целом картина снегонакопления более равномерная, чем при моделировании в нестационарной постановке, ввиду симметричности задачи и отсутствия влияния дорожки Кармана на рост снегового покрова из-за стационарного моделирования. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в данной задаче использования модели уноса-отложения, дополненной гипотезой стационарности, также достаточно для адекватного моделирования снегоотложений.

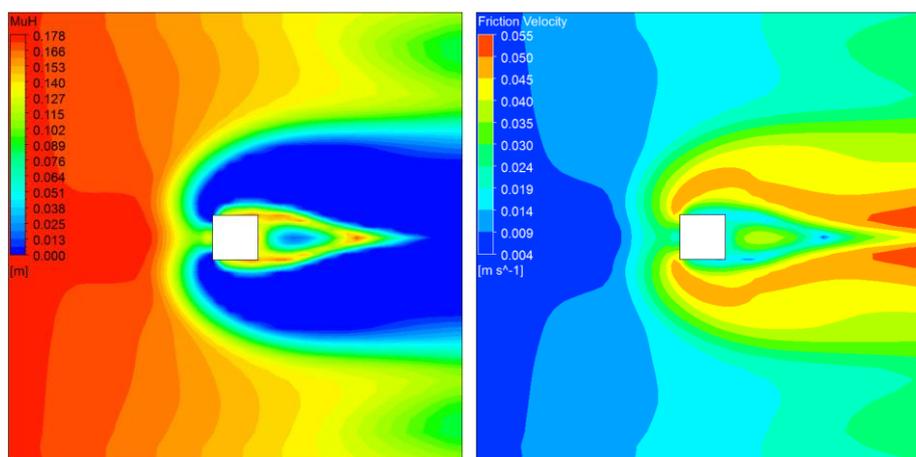


Рисунок 6 – Рассчитанные снегоотложения и скорость трения в расчетной области

*Вторая задача* – пример расчета снеговой нагрузки на покрытие, для которого известна схема расчетного коэффициента формы из строительных норм (распределение снега на двускатной крыше). В этой задаче накопление снега исследуется как качественно, так и количественно, с расчетом коэффициента формы  $\mu$  для каждого ската. В качестве расчетной области выбрана геометрия динамического контура аэродинамической трубы “Jules Verne” CSTB, так как для верификации использовались данные из отчета к Eurocode.

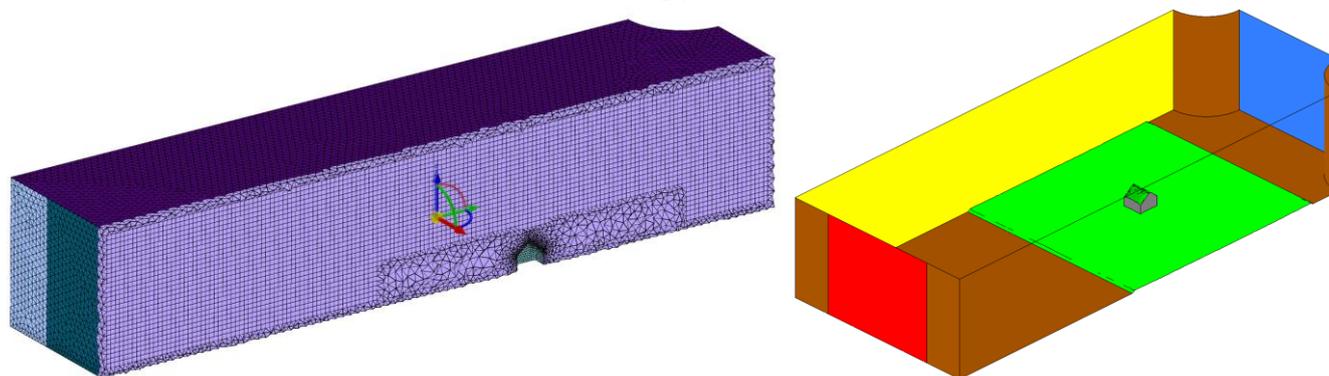


Рисунок 7 – Сечение расчетной сетки и схема аэродинамического домена

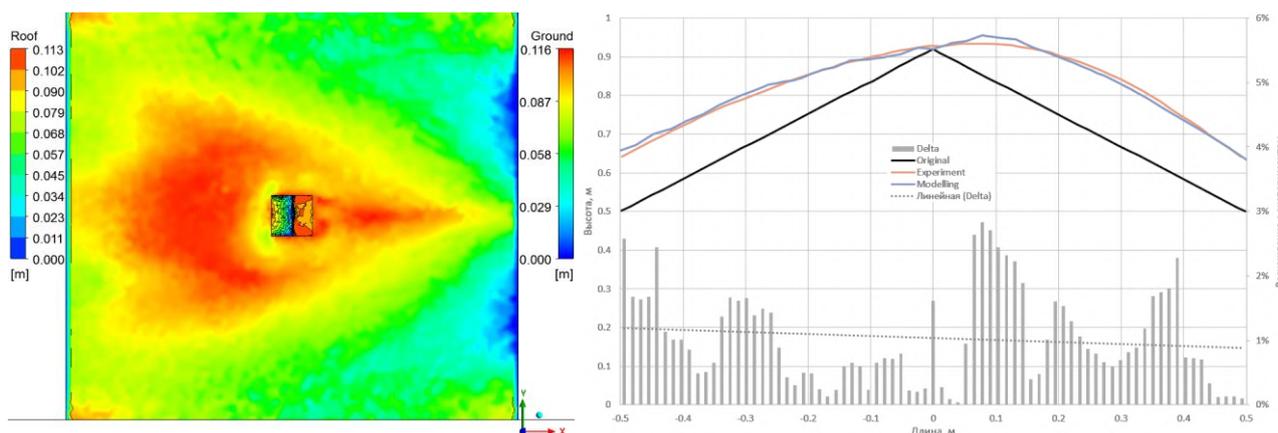


Рисунок 8 – Характерные снеговые мешки на двускатной крыше и сопоставление результатов моделирования с экспериментом в центральном сечении (расхождение: минимальное – 0.03%, максимальное – 2.83%, среднее – 1.03%)

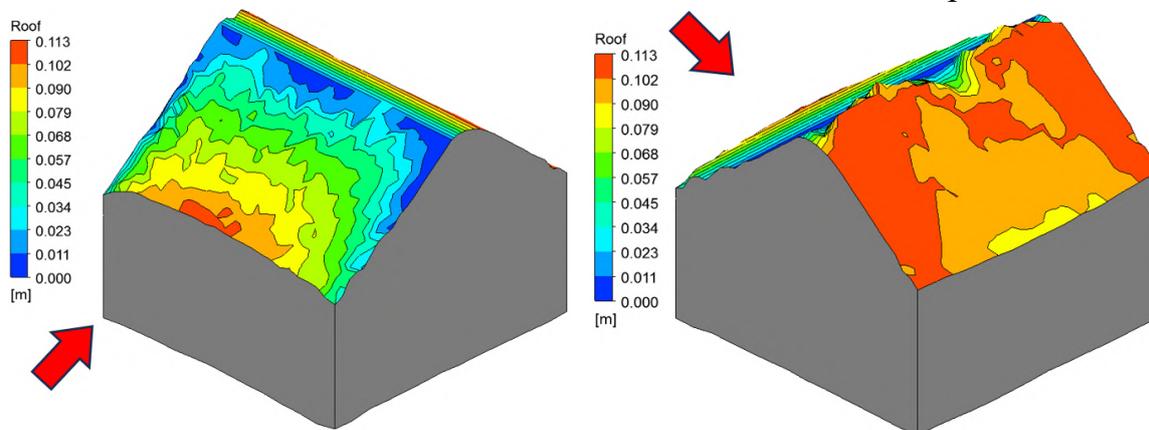


Рисунок 9 – Рассчитанные формы снеговых мешков при обдуве поперек конька здания

Таблица 1 – Сравнение интегральных значений моделируемого коэффициента формы по результатам физического и численного моделирования с нормами

Моделирование	$H_{ground}$ , см	$\mu_{ww}$ (наветренная сторона)	$\mu_{lw}$ (подветренная сторона)
Физическое	10.5	0.88	1.13
Численное	8.01	0.74	1.29
Нормативное распределение		0.75	1.25
Расхождение с численным моделированием, %		1.33	3.2

С применением методики в *нестационарной постановке* в расчетной области размером (тестовой камеры)  $25 \times 10 \times 6$  м моделировалось обтекание модели здания размером  $1 \times 1 \times 0.92$  м двухфазным потоком в эйлеровой постановке с логарифмическим профилем скорости и теми же характеристиками, что при решении первой верификационной задачи. Аэродинамический домен (рисунок 7, справа) формировался из конечнообъемной сетки (рисунок 7, слева), созданной с помощью модуля ANSYS Fluent Meshing: вокруг объекта была создана сетка из тетраэдров для динамического перестроения, остальная область была заполнена полигексагональными элементами. Расчет выполнялся в комплексе ANSYS Fluent в течение 60 мин физического времени с шагом 1 с. Для моделирования турбулентности использовался подход URANS – обобщенная  $k-\omega$  модель ( $C_{SEP} = 0.7$ ) со стандартными пристеночными функциями в нестационарной постановке. На каждый временной шаг задавалось максимум 20 итераций.

Рассчитанное на покрытии здания снегонакопление согласуется как с данными натуральных наблюдений, так и с результатами физического моделирования (рисунок 8, справа). Качественно были получены унос снега на наветренной стороне крыши и отложение – на подветренной стороне. Количественно результаты согласуются как в центральном сечении покрытия (рисунок 8, справа), так и интегрально как со строительными нормами, так и с экспериментом (таблица 1). При этом из изополей рассчитанного накопления (рисунок 8, слева, рисунок 9) следует, что в результате моделирования было получено частное распределение снега по покрытию, существенно зависящее от начальных и граничных условий: скорости входного потока, пороговой скорости трения; концентрации снежной фазы в потоке. Таким образом, данный результат свидетельствует о том, что хотя моделирование в нестационарной постановке и может предоставить адекватный количественный результат, для этого могут потребоваться многократные расчеты.

С применением методики в *стационарной постановке* в аналогичной расчетной области моделировалось обтекание модели здания размером  $1 \times 1 \times 0.92$  м однофазным потоком в эйлеровой постановке с логарифмическим профилем скорости. Критерием окончания счета было назначено максимальное количество итераций (150) или достижение максимальных невязок по давлению и по всем компонентам скорости ( $10^{-4}$ ). Для моделирования турбулентности использовалась обобщенная  $k-\omega$  модель ( $C_{SEP} = 0.7$ ) со стандартными пристеночными функциями.

Рассчитанное снегонакопление в целом согласуется как с результатами эксперимента, так и с нормативными рекомендациями как качественно, так и количественно, однако расхождение с экспериментом существенно больше, чем при моделировании в нестационарной постановке (5.24% против 1.03%). Основным отличием между результатами в центральном сечении покрытия (рисунок 10, справа) является снеговой мешок вблизи конька модели. В реальности снег в этой зоне сдувается набегающим потоком, однако в данном случае визуализируется его накопление. Как и в случае с наветренным сугробом вблизи отдельно стоящего куба, это связано с величиной скорости трения в данной локации. В ходе нестационарного моделирования ее значение увеличивается по мере роста снегового покрова, в то время как при стационарном моделировании остается постоянно низким, поскольку данная часть покрытия находится в зоне аэродинамической тени. Тем не менее, интегральное значение численно моделируемого коэффициента формы согласуется как с результатами физического

моделирования, так и с нормативными рекомендациями. Это позволяет сделать вывод, что результаты моделирования в стационарной постановке возможно использовать для оценки снегонакопления на покрытии здания в общем.

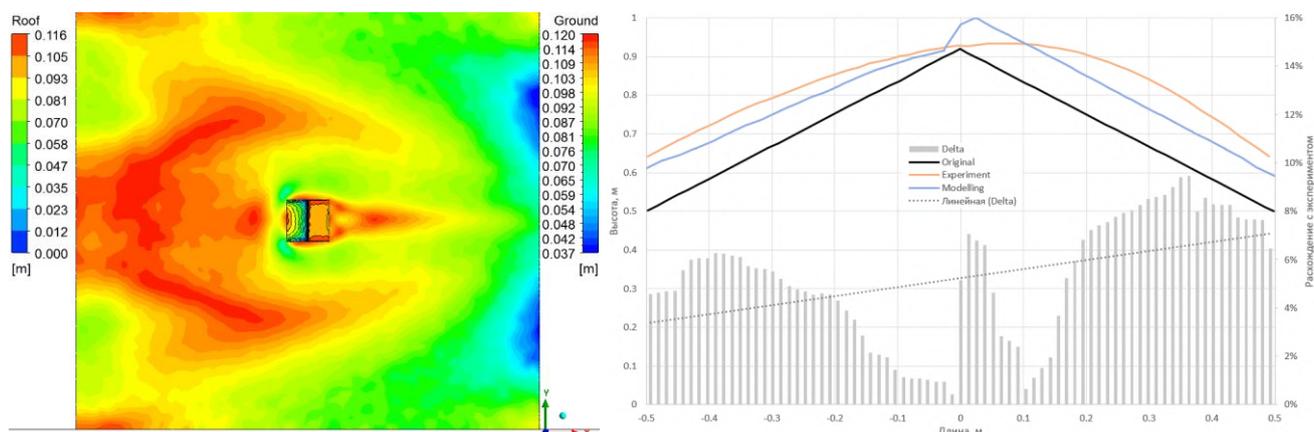


Рисунок 10 – Характерные снеговые мешки на двускатной крыше и сопоставление результатов моделирования с экспериментом в центральном сечении (расхождение: минимальное – 0.44%, максимальное – 9.45%, среднее – 5.24%)

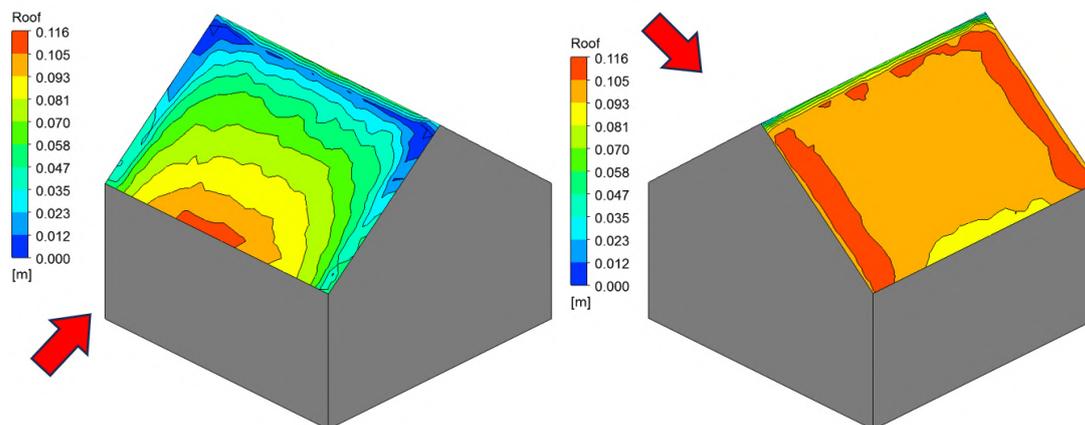


Рисунок 11 – Рассчитанные формы снеговых мешков при обдуве поперек конька здания

Таблица 2 – Сравнение интегральных значений моделируемого коэффициента формы по результатам физического и численного моделирования с нормами

Моделирование	$H_{ground}$ , см	$\mu_{ww}$ (наветренная сторона)	$\mu_{lw}$ (подветренная сторона)
Физическое	10.5	0.88	1.13
Численное	8	0.73	1.27
Нормативное распределение		0.75	1.25
Расхождение с численным моделированием, %		2.67	1.6

В **четвертой** главе описан процесс апробации разработанной методики на реальных объектах большепролетного и уникального строительства.

Апробация **методики в нестационарной постановке** проводилась для реального строящегося здания, для которого необходимо было исследовать накопление снега на крыше.

Обтекание вокруг цеха №104 объекта «Центр строительства крупнотоннажных морских сооружений (ЦСКМС)» (рисунок 12, слева) моделировалось двухфазным потоком в эйлеровой постановке с теми же характеристиками, что и в предыдущих случаях, в

прямоугольной расчетной области размером  $519 \times 953 \times 125$  м, в течение 40 мин с шагом по времени 1 с. В данной задаче плотность вторичной фазы составляет  $300 \text{ кг/м}^3$ . Аэродинамическая область формируется из конечно-объемной сетки (рисунок 12, по центру и справа). Начальные условия, скорость на входе и объемная доля снега, варьировались для получения различных моделей накопления снега на крыше. Параметры представлены в таблице 3.

В результате были получены три распределения снегоотложений на крыше (рисунок 13). Хотя качественно они позволяют определить направление переноса снега и количественно высоту снежного покрова, на их основе нельзя сделать общий вывод о значении коэффициента расчетной формы  $\mu$ , так как получены индивидуальные случаи накопления снега.

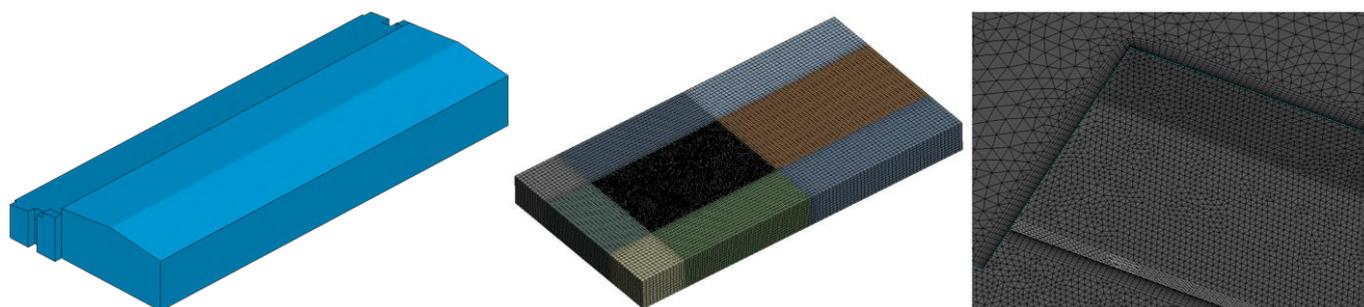


Рисунок 12 – Геометрия цеха №104, расчетная сетка, пограничный слой сетки

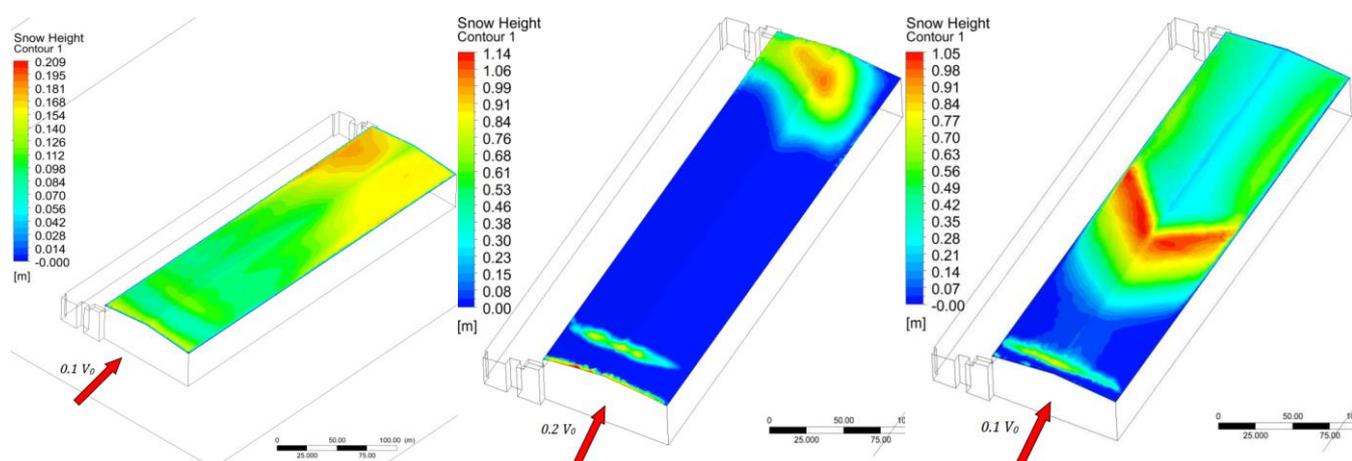


Рисунок 13 – Конечные распределения снегоотложений на покрытии цеха для расчетного случая 1 (слева), 2 ( по центру) и 3 (справа)

Таблица 3 – Сводная таблица результатов численного моделирования для цеха №104

Расчетный случай	Характер снегопада	$V_{10}$ [м/с]	$H_{roof}$ [см]	$C$ [%· $10^{-3}$ ]	Распределение
1	Слабый	0.84	20.9	0.19	Почти равномерное
2	Слабый	1.69	114	1.34	Неравномерное
3	Умеренный	0.84	105	1.2	Неравномерное

Апробация *методики в стационарной постановке* проводилась для нескольких реальных строящихся объектов, для которых синтез численного моделирования и рекомендаций строительных норм позволил получить расчетный коэффициент формы  $\mu$ . Для всех расчетов были приняты следующие значения экспериментальных констант:  $Ar_a = 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{с/м}^4$ ,  $w_f = 0.5 \text{ м/с}$ ,  $u_t = 0.25 \text{ м/с}$ .

Обтекание Главного корпуса Подмосковного образовательного молодежного

центра «Мастерская управления «Сенеж»» («Агора») (рисунок 14, слева) моделировалось однофазным потоком в цилиндрической расчетной области размером  $600 \times 100$  м в течение 200 итераций. Расчёты выполнялись для десяти скоростей ветрового потока (от 1 м/с до 10 м/с с шагом 1 м/с) и двух направлений ветра ( $180^\circ$  и  $210^\circ$ ; ввиду симметричности рассматриваемого здания) без учета окружающей застройки. Концентрация снега  $C$  была принята равной  $5 \text{ г/м}^3$  (умеренный снегопад). Полученные распределения численно моделируемого коэффициента формы  $\mu_{nm}$  были проанализированы с точки зрения механической безопасности и обобщены в виде схем расчетного коэффициента формы  $\mu$ .

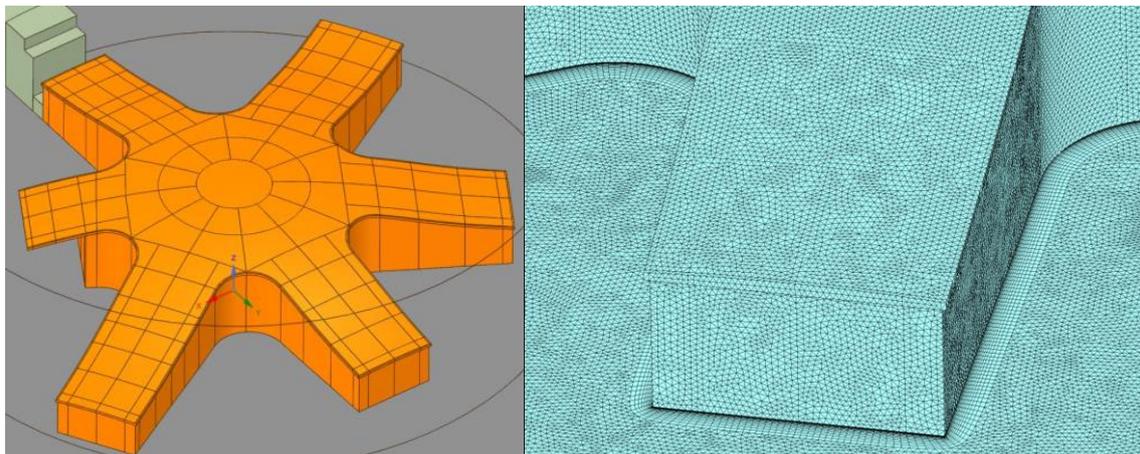


Рисунок 14 – Геометрия «Агоры» и пограничный слой конечнообъемной сетки

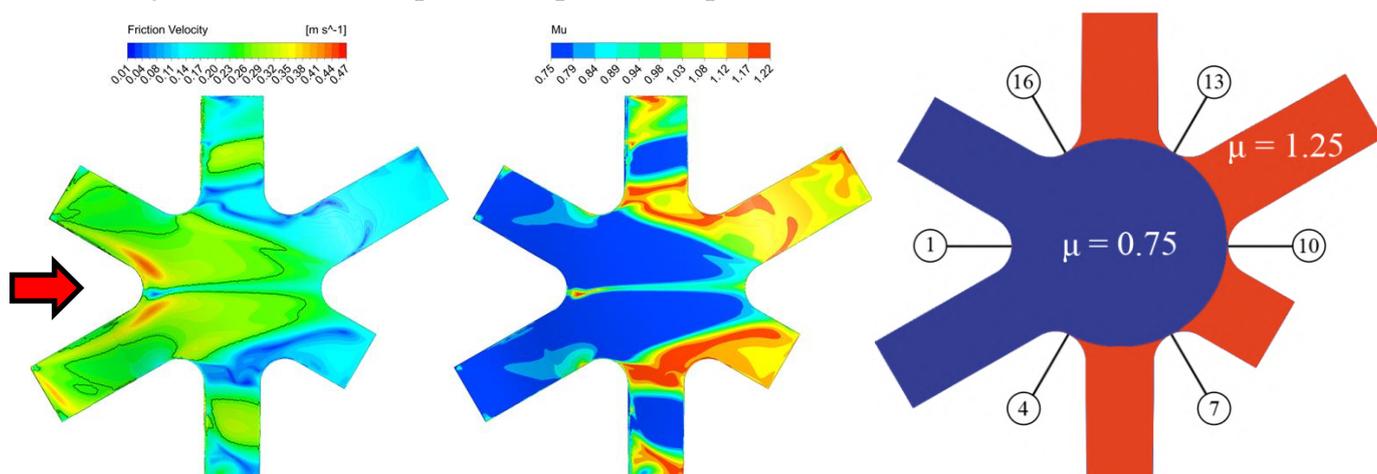


Рисунок 15 – Изополя скорости трения, моделируемого (по центру) и расчетного (справа) коэффициента формы  $\mu$  для направления ветра  $180^\circ$  и скорости ветра 7 м/с

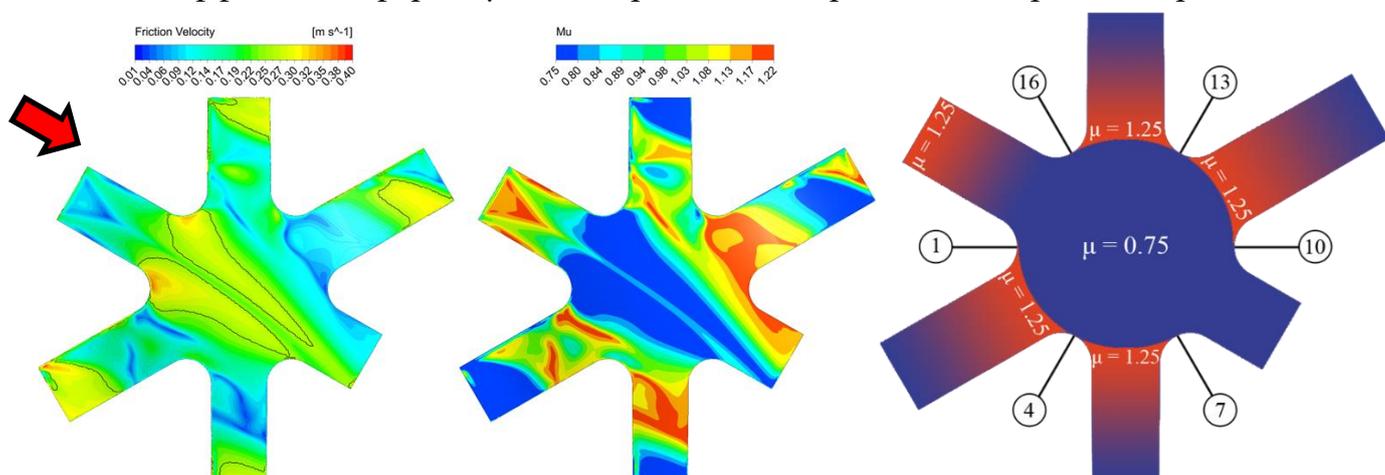


Рисунок 16 – Изополя скорости трения, моделируемого (по центру) и расчетного (справа) коэффициента формы  $\mu$  для направления ветра  $210^\circ$  и скорости ветра 7 м/с

Моделирования «Агоры» позволили тщательно откалибровать методику в стационарной постановке. В частности, было показано, что для получения достаточного набора распределений численно моделируемого коэффициента формы  $\mu_{nm}$  можно использовать меньшее количество скоростей (и, соответственно, расчетных случаев).

Обтекание Серфинг-центра «Волна» (рисунок 17) моделировалось в стационарной постановке однофазным потоком в цилиндрической расчетной области размером  $1500 \times 1200$  м в течение 200 итераций. Для выявления наиболее неблагоприятных распределений снеговой нагрузки в этой задаче были рассмотрены два расчетных варианта: с учетом окружающей застройки и рельефа и без учета. При численном моделировании были выполнены расчёты для трёх скоростей ветрового потока (1 м/с, 3 м/с и 6 м/с) и восьми направлений ветра ( $0^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $144^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $213^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $327^\circ$ ; всего 24 расчетных случая).

Для Серфинг-центра также было выполнено и физическое (экспериментальное) моделирование в аэродинамической трубе, что позволило сравнить результаты, полученные двумя подходами, и выполнить взаимную валидацию. При физическом моделировании исследовались те же направления ветра, что и при численном, а характерные скорости ветра, при которых анализировался перенос снега на модели, варьировались от 3.4 до 8 м/с. Моделирование проводилось при влажности 3.5-4% с использованием древесной муки с размером частиц  $50 \div 250$  мкм в качестве снегоимитатора, который сдувался с гладкой окрашенной поверхности модели. В результате длительной продувки модели, покрытой тонким слоем древесной муки, в воздушном потоке на скорости  $6 \div 7$  м/с начиналось формирование картин снегопереноса. Анализ полученных распределений снега был проведен для зонирования кровли и получения физически смоделированного коэффициента формы  $\mu_{pm}$ . Как и при численном моделировании, моделирование проводилось с учетом и без учета окружающей застройки, хотя и с меньшим радиусом ввиду размеров тестовой секции аэродинамической трубы.

При сравнении результатов было явно обнаружено, что и физическое, и численное моделирование позволяют получить в целом схожие распределения снега. Между собой согласуются как общее распределение снегоотложений, так и локальные снегоотложения (рисунки 18 и 19, слева и справа; рисунки 20 и 21, слева и справа). Также было отмечено схожее влияние окружающей застройки на полученные результаты. В соответствии с методикой, результаты, полученные двумя подходами, были обобщены и качественно использованы в инженерном анализе в сочетании с рекомендациями строительных норм и правил, что позволило получить схемы расчетного коэффициента формы  $\mu$  (рисунок 22). В частности, снеговая нагрузка на небольшую зону  $\mu = 2,7 \div 0,6$  в правой части покрытия была определена в соответствии с рекомендациями норм.

В заключение следует отметить, что использование численного моделирования для обоих расчетных случаев позволило получить расчетный коэффициент формы  $\mu$ , а также определить некоторые неочевидные и опасные распределения этого коэффициента, которые не могли быть получены только на основе рекомендаций российских или любых других строительных норм и правил. Физическое моделирование, проведенное для Серфинг-центра, также наглядно показало, что численное моделирование способно дать аналогичные и, следовательно, правдоподобные результаты, которые соответствуют природе процессов снегонакопления и снегопереноса.

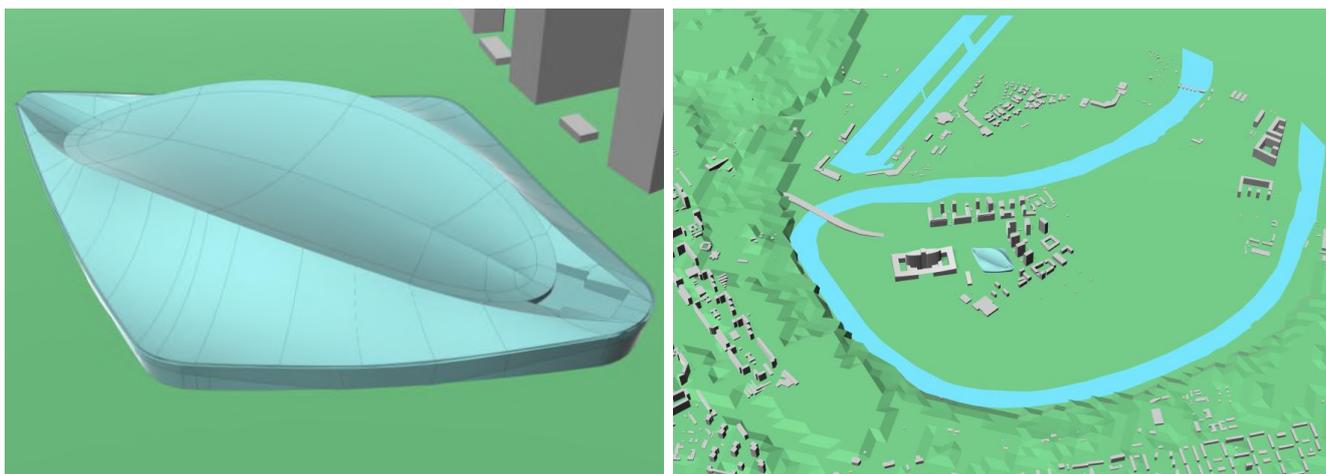


Рисунок 17 – Геометрия «Волны» (слева) и окружающие застройка и рельеф (справа)



Рисунок 18 – Физическое моделирование снегонакопления для направлений ветра 144° (слева) и 213° (справа)

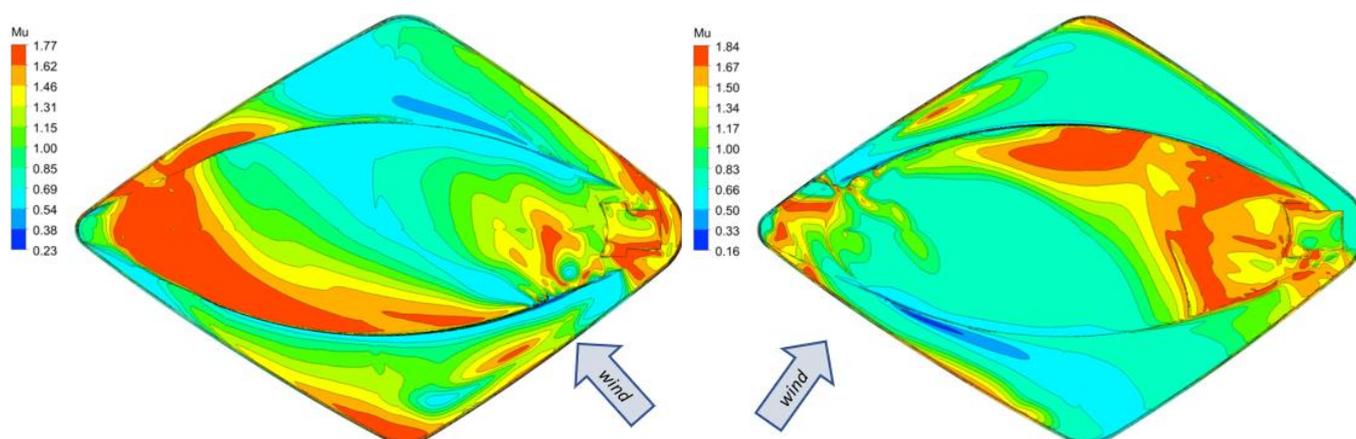


Рисунок 19 – Численное моделирование снегонакопления для направлений ветра 144° (слева) и 213° (справа)

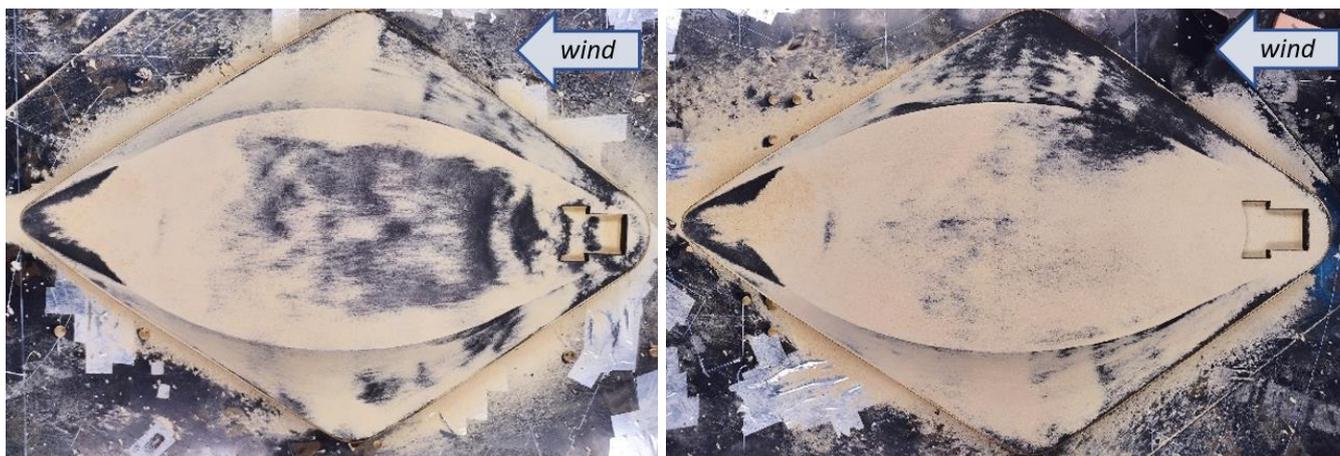


Рисунок 20 – Физическое моделирование снегонакопления для направления ветра  $90^\circ$  без учета (слева) и с учетом (справа) окружающей застройки

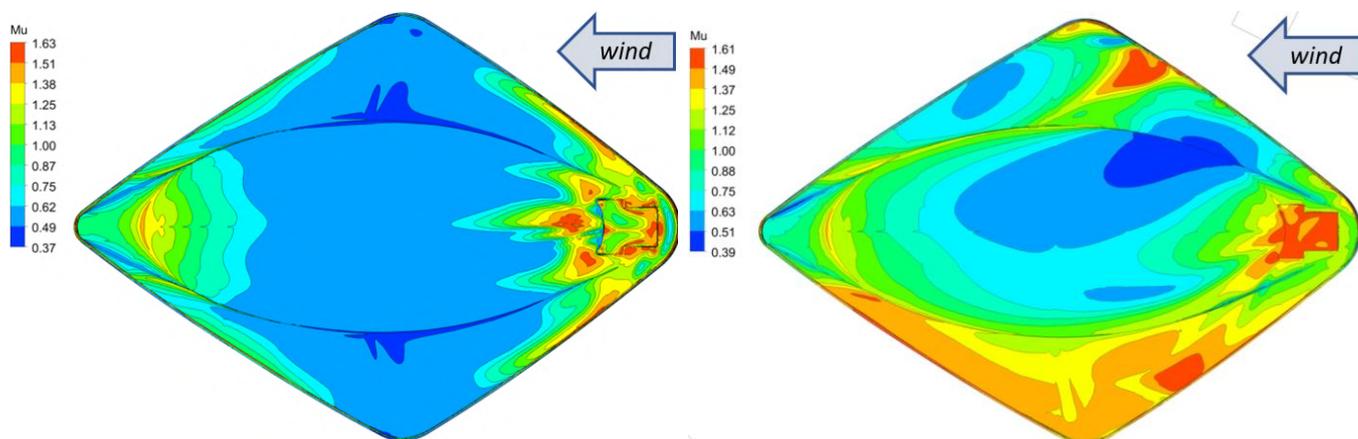


Рисунок 21 – Численное моделирование снегонакопления для направления ветра  $90^\circ$  без учета (слева) и с учетом (справа) окружающей застройки

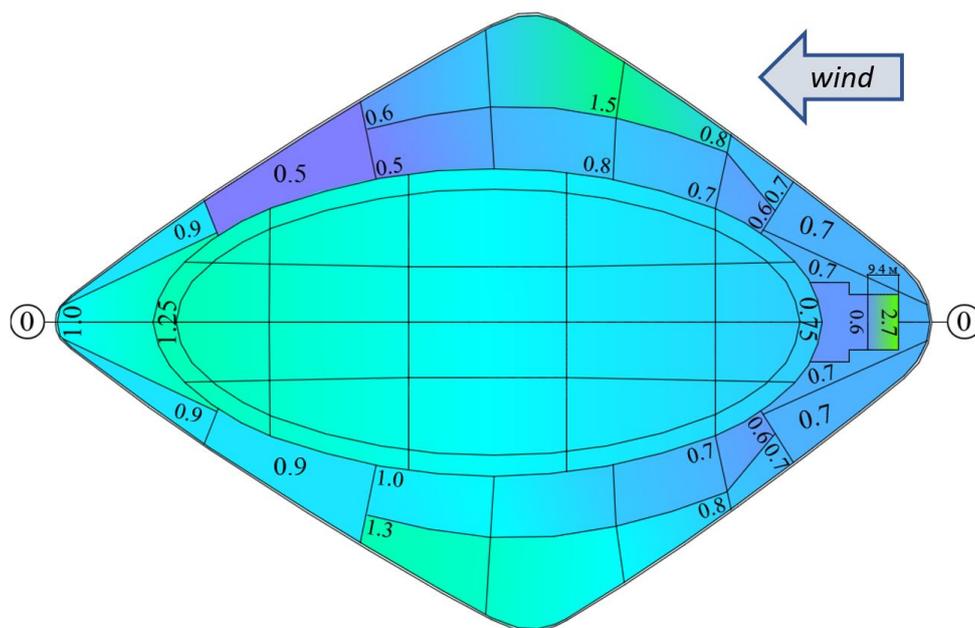


Рисунок 22 – Расчетный коэффициент формы  $\mu$  для направления ветра  $90^\circ$ , полученный по результатам физического и численного моделирований и рекомендациям строительных норм

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована необходимость разработки методики численного моделирования снегонакопления и снегопереноса на покрытиях большепролетных зданий и сооружений по результатам выполненного обзорно-аналитического исследования существующих методов расчета снеговой нагрузки на покрытия большепролетных зданий и сооружений.

2. Разработана методика численного моделирования снеговых нагрузок в нестационарной и стационарной постановке на основании исследования современных методов вычислительной аэрогидродинамики и подходов к моделированию снегонакопления. Изучены особенности модели уноса-отложения, положенной в их основу, определены границы применимости.

3. Доказана способность методики в нестационарной постановке получать правдоподобные результаты, согласующиеся с результатами натурных наблюдений и физического (экспериментального) моделирования. Верификация методики также выявила ее высокую чувствительность к начальным условиям и способность обеспечить широкое разнообразие распределений снега для одной и той же геометрии покрытия при различных скоростях потока. Тем не менее, высокая ресурсоемкость и требования к времени вычислений затрудняют применение методики для решения инженерных задач в тех случаях, когда требуется рассмотреть несколько расчетных случаев и проводить серийные расчеты. В этом смысле возможность получения частных случаев снегонакопления и снегопереноса также оказывается ее недостатком, поскольку для получения более общего распределения снега на покрытии, близкого к нормативному, требуется многократно варьировать начальные условия и обобщать полученные результаты.

4. Показано, что методика в стационарной постановке успешно сочетает достоинства нестационарной методики и независимость от времени, не теряя при этом в точности. Для широкого диапазона типов большепролетных покрытий расчета в стационарной постановке оказывается достаточно, чтобы получать правдоподобные результаты. Сравнение с натурными наблюдениями и физическим (экспериментальным) моделированием показывает, что численное моделирование позволяет ничуть не менее эффективно рассчитывать снегонакопление и снегоперенос и может быть использовано для получения расчетного коэффициента формы  $\mu$  с определенными допущениями. При применении методики в стационарной постановке результаты численного моделирования используются в сочетании с рекомендациями строительных норм и сводов правил. При таком подходе методика может применяться в инженерной практике благодаря меньшей ресурсоемкости и более высокой эффективности, а также более общему характеру получаемых распределений снега.

5. Представленные результаты диссертационного исследования позволяют рекомендовать разработанную методику численного моделирования и результаты решения верификационных задач в практике расчетных исследований большепролетных зданий и сооружений на значимых этапах их жизненного цикла.

6. Перспективой дальнейшей разработки темы является наукоемкая интеграция предложенной методики численного моделирования снеговых нагрузок в разрабатываемые и действующие системы мониторинга состояния большепролетных и уникальных зданий и сооружений и продолжение изучения особенностей моделирования снегонакопления и снегопереноса на их покрытиях с помощью учета дополнительных явлений.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ*****а) в рецензируемых научных изданиях:***

1) Бритиков, Н. Numerical modelling of snow deposits and snow transport on long-span roofs for steady and unsteady flow / Н. Бритиков //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). – 2022. – Т. 18. – №. 4. – С. 23-38.

2) Белостоцкий, А. Comparison of determination of snow loads for roofs in building codes of various countries / А. Белостоцкий, Н. Бритиков, О. Горячевский //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). – 2021. – Т. 17. – №. 3. – С. 39-47.

3) Белостоцкий, А. Critical review of modern numerical modelling of snow accumulation on roofs with arbitrary geometry / А. Белостоцкий, Н. Бритиков, О. Горячевский //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). – 2021. – Т. 17. – №. 4. – С. 40-59.

4) Белостоцкий, А. Critical review of physical modelling of snow accumulation on roofs with arbitrary geometry / А. Белостоцкий, О. Горячевский, Н. Бритиков //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). – 2021. – Т. 17. – №. 4. – С. 22-39.

***б) в других изданиях и материалах конференций:***

5) Бритиков, Н.А. О вычислении коэффициента перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие на основе модели снегоотложения / Н.А. Бритиков, О.С. Горячевский //ББК 1 Е91. – 2020. – С. 62.

6) Белостоцкий, А.М. О математическом (численном) моделировании для определения расчетных снеговых нагрузок на большепролетные сооружения / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, Н.А. Бритиков //Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году. – 2020. – С. 55-60.

7) Бритиков, Н.А. Примеры расчета снеговой нагрузки с применением численного моделирования снегоотложений и снегопереноса / Н.А. Бритиков, А.М. Белостоцкий //Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки. – 2020. – С. 13-16.

**Бритиков Никита Александрович**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЕГОВЫХ НАГРУЗОК  
НА ПОКРЫТИЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения  
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 21 декабря 2023 года

Формат 60x90/16

Объем 1.5 п.л.

Заказ №417

Тираж 80 экз.

---

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9