

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»  
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



**БРИТИКОВ НИКИТА АЛЕКСАНДРОВИЧ**

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

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Москва – 2023 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ НОРМАТИВНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СНЕГОВЫХ НАГРУЗОК НА ПОКРЫТИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ .....	14
1.1 Общие положения .....	14
1.2 Обзор нормативных документов в части численного моделирования снеговых нагрузок на большепролетные покрытия .....	22
1.2.1 Сравнение положений нормативных документов .....	23
1.2.2 Пример вычисления снеговой нагрузки на трехуровневую кровлю .....	28
1.3 Обзор исследований снеговых нагрузок экспериментальными методами ...	31
1.3.1 Общие сведения.....	31
1.3.2 Метод частиц и снегоимитаторы.....	35
1.3.3 Физическое моделирование как инструмент создания численных моделей.....	41
1.3.4 Анализ и обработка результатов эксперимента.....	42
Выводы по главе 1 .....	44
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ НА ПОКРЫТИЯХ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....	48
2.1 Уравнения поведения газа. Моделирование турбулентности .....	48
2.1.1 «Разрешающая» $k$ - $\epsilon$ модель (Realizable $k$ - $\epsilon$ ) .....	49
2.1.2 Модель $k$ - $\omega$ Shear Stress Transport (SST).....	52
2.1.3 Обобщенная $k$ - $\omega$ модель (Generalized $k$ - $\omega$ ) .....	55
2.2 Численное моделирование сальтирующего слоя снегопереноса.....	58
2.3 Методика численного моделирования снегонакопления и снегопереноса в нестационарной постановке .....	64
2.4 Методика численного моделирования снегонакопления и снегопереноса в стационарной постановке .....	66

2.5 Назначение расчетного коэффициента формы по результатам численного моделирования снегонакопления и снегопереноса .....	70
Выводы по главе 2.....	74
<b>ГЛАВА 3. ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ НА ПОКРЫТИЯХ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....</b>	<b>77</b>
3.1 Общие положения. Выбор верификационных задач.....	77
3.2 Снегонакопление вокруг отдельно стоящего куба в нестационарной постановке.....	78
3.2.1 Описание расчетной модели .....	78
3.2.2 Параметры расчета.....	79
3.2.3 Анализ полученных результатов .....	83
3.3 Снегонакопление вокруг отдельно стоящего куба в стационарной постановке.....	86
3.3.1 Описание расчетной модели .....	86
3.3.2 Параметры расчета.....	86
3.3.3 Анализ полученных результатов .....	87
3.4 Снегонакопление на двускатном покрытии в нестационарной постановке .	88
3.4.1 Описание расчетной модели .....	88
3.4.2 Параметры расчета.....	89
3.4.3 Анализ полученных результатов .....	92
3.5 Снегонакопление на двускатном покрытии в стационарной постановке .....	96
3.5.1 Описание расчетной модели .....	96
3.5.2 Параметры расчета.....	96
3.5.3 Анализ полученных результатов .....	96
Выводы по главе 3.....	100
<b>ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ НА ПОКРЫТИЯХ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....</b>	<b>102</b>
4.1 Постановка задач расчетных исследований .....	102

4.2 Численное моделирование снеговой нагрузки на покрытие большепролетного сооружения («Цех №104») в нестационарной постановке	103
4.2.1 Описание расчетной модели .....	103
4.3.2 Параметры расчета.....	104
4.3.3 Анализ полученных результатов .....	107
4.3 Численное моделирование снеговой нагрузки на покрытие большепролетного здания («Агора») в стационарной постановке .....	111
4.3.1 Описание расчетной модели .....	111
4.3.2 Параметры расчета.....	115
4.3.3 Анализ полученных результатов .....	115
4.4 Численное и экспериментальное моделирование снеговой нагрузки на покрытие большепролетного здания («Волна») .....	118
4.4.1 Описание расчетных и экспериментальных моделей .....	118
4.4.2 Условия проведения эксперимента и параметры расчета .....	118
4.4.3 Анализ и сравнение полученных результатов .....	123
Выводы по главе 4.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Снеговая нагрузка относится к климатическим нагрузкам и является одним из основных воздействий, которым подвергаются несущие конструкции большепролетных зданий и сооружений. Формирование снеговой нагрузки на покрытия 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, их высокой нелинейностью и сильной связанностью. Один из этих подпроцессов – снегоперенос, который вносит основной вклад в перераспределении снега по покрытию – является предметом многолетних теоретических, экспериментальных и численных исследований. Образование достаточно однородных сугробов в результате постепенного наноса снежинок размерами от микрон до миллиметров представляет собой серьезную вычислительную проблему, особенно если учесть, что для большинства отраслей, в которых оно имеет значение, его требуется рассматривать на областях площадью в десятки и даже сотни квадратных метров. Известные недостатки физического (экспериментального) моделирования форм снегоотложений, такие как применение снегоимитаторов (песка, стекла, пенопласта и др.), невозможность полного выполнения условий подобия и контроля над всеми условиями проведения эксперимента, а также естественная случайность погоды, влияющей на натурные наблюдения, вынуждает ученых и инженеров обращаться к математическим (численным) методам, с помощью которых возможно было бы как устранить вышеуказанные проблемы, так и получить еще более гибкие, точные и эффективные инструменты моделирования. Одной из основных отраслей, требующих вычислительного подхода, 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, даже комбинаций которых обычно оказывается недостаточно для описания сложной геометрии покрытий. Также на большой площади

таких покрытий могут образовываться локальные снеговые мешки, создающие повышенную нагрузку, которые невозможно учесть нормами. Поэтому каждое такое здание или сооружение требует индивидуального моделирования снеговой нагрузки. Для этого нормами предусмотрено проведение мероприятий по моделированию снеговой нагрузки – как правило, физического (т.е. с помощью продувок в аэродинамических трубах), однако в некоторых странах наравне с ним допускается проводить и математическое – например, в Eurocode (в отличие от СП), эта возможность прямо зафиксирована. Более того, в связи с неубывающей тенденцией к экономии строительных ресурсов, которая не позволяет проектировщикам закладывать слишком большие запасы прочности, применение математического моделирования могло бы улучшить и сами нормы: например, за счет увеличения числа типовых покрытий, а также уточнения значений расчетного коэффициента формы для уже существующих покрытий. К тому же, по-прежнему актуальными остаются и другие проблемы, связанные с прогнозированием снегообразования и снегонакопления: таяние снега на покрытиях, образование гололеда и расчет гололедных нагрузок, лавинообразование в горных регионах и другие. При всем вышесказанном, несмотря на существенный запрос со стороны отрасли, за последние десятилетия не было создано единой, верифицированной, валидированной и апробированной численной методики моделирования снегонакопления в общем и снегопереноса в частности, которую можно было бы предложить для включения 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, и является в этом смысле достаточно узкоспециальной дисциплиной. Рассмотрение ее положений или взаимосвязи с другими ветвями гидрогазодинамики как в научно-

историческом контексте, так и с точки зрения методологии происходит преимущественно в научно-исследовательских статьях. В разные годы проблемами численного моделирования снега занимались группы ученых из разных стран. Ключевыми считаются работы Т. Уэматы (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). Также к важнейшим работам по данной теме относятся исследования по моделированию физики песка, из которых к фундаментальным относятся руководство Р.А. Бэгнолда (R.A. Bagnold), а среди авторов знаковых работ – Р.С. Андерсон и П.К. Хафф (R.S. Anderson, P.K. Haff). В настоящее время активно занимаются моделированием снеготранспорта и снеготложений 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 снеготложений и снеготранспорта для расчета снеговой нагрузки на покрытия большепролетных зданий и сооружений.

Для достижения поставленной цели были сформированы 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 снеготложений с учетом геометрических параметров покрытия и характеристик снеговетрового потока и влияние временного фактора на формирование снеготложений на большепролетных покрытиях зданий и сооружений.

3. Разработать методику численного моделирования снеготранспорта и снеготложения 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 снегонакопления и снегопереноса.

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

**Предмет исследования.** Методы вычислительной аэродинамики, модели снегонакопления и снегопереноса, 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.

**Методология и методы исследования.** Теоретическое основание составляют фундаментальные научные работы исследователей физики и свойств снега, специалистов по численному моделированию снегопереноса и снегоотложений, решения задач в связанной аэроупругой постановке, 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 разработанной методики проводилась с помощью языков программирования C/C++, Perl, Python, Scheme. Для выполнения расчетов по верификации и



апробации разработанной методики использовался программный комплекс ANSYS (модули Fluent, CFX, CFD Post, Meshing, SpaceClaim).

**Научно-техническая гипотеза** диссертации базируется на возможности использования основных теоретических положений аэрогидродинамики и современных мощностей вычислительной техники для учета геометрического разнообразия кровли и воздействий ветра на снегонакопление и снегоперенос на большепролетном покрытии.

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

1. Доказана применимость уравнений модели уноса-отложения для моделирования снегонакопления и снегопереноса на большепролетных покрытиях зданий и сооружений.

2. Показано, что в общем для расчета снегонакопления на большепролетных покрытиях зданий и сооружений достаточно моделировать только сальтирующий слой снегопереноса.

3. Сформулирована и обоснована гипотеза о независимости потока массопереноса снега от времени для моделирования снегонакопления и снегопереноса 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.).

**Внедрение результатов исследования.** Результаты диссертации использованы в научно-исследовательских работах Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов (НОЦ КМ) им. А.Б. Золотова и Учебно-научно-производственной лаборатории аэродинамических и аэроакустических испытаний строительных конструкций (УНПЛ ААИСК) НИУ МГСУ и АО «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (АО НИЦ СтаДиО).

В частности, на основе выполненного автором аналитического обзора, представленного в главе 1 диссертации, была реализована научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа «Математическое (численное) моделирование для определения расчетных снеговых нагрузок на большепролетные сооружения» [57] по заказу ФАУ ФЦС Минстроя России, в которой были предложены изменения и

дополнения в СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85\* Нагрузки и воздействия». Разработанная автором методика и принципы ее применения, представленные в главе 2 диссертации, были предложены и внедрены в стандарт организации «Численное моделирование ветровых и снеговых воздействий» [66] ФГБОУ ВО НИУ МГСУ (на момент публикации диссертации находится в разработке).

Апробация разработанной методики проводилась при расчете проектируемых большепролетных и уникальных зданий и сооружений – цеха №104 объекта «Центр строительства крупнотоннажных морских сооружений (ЦСКМС)» [49]; Главного корпуса Подмосковского образовательного молодежного центра «Мастерская управления “Сенеж”» («Агора») [50]; Серфинг-парка «Волна» [51].

**Достоверность и обоснованность научных положений** основывается на:

1. Строгости используемого математического аппарата и корректности постановок задач в рамках теоретических предпосылок строительной механики и механики жидкости и газа.
2. Согласованности полученных результатов численного моделирования верификационных примеров с экспериментальными данными, аналитическими и численно-аналитическими решениями.

**Основные положения исследования, 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 разработанных методик.

### **Личный вклад автора диссертации:**

1. Выполнен критический обзор состояния проблемы на сегодняшний день, изучены и проанализированы на предмет использования в разрабатываемых методиках существующие методы моделирования всех процессов снегонакопления, современные методы вычислительной аэрогидродинамики и программные комплексы, реализующие их;
2. Разработана, верифицирована и апробирована численная методика моделирования снегонакопления и снегопереноса для вычисления снеговой нагрузки на покрытия большепролетных зданий и сооружений, выполнены расчетные исследования, включая построение расчетных моделей, их верификацию, оптимизацию;
3. Для решения поставленных задач были разработаны собственные программы и алгоритмы (в т.ч. скрипты, файлы инструкций и пр.);
4. Разработаны рекомендации по выполнению численного моделирования снеговых нагрузок на покрытия большепролетных зданий и сооружений, анализу, обработке и использованию результатов моделирования для назначения расчетного коэффициента формы на покрытии.

**Апробация работы.** 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 (гражданских, промышленных, транспортных и др.) 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. Расчетное обоснование/обеспечение сейсмостойкости. Метод

стоячих волн: исследования инженерных объектов сложных конструкций. 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.

**Публикации результатов диссертации.** Все научные результаты, представленные в настоящей диссертации, опубликованы в 7 работах автора [5-8, 11-13], 4 из которых (работы [6-8, 11]) опубликованы в изданиях, входящих в утвержденный ВАК перечень ведущих рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (171 наименование, в том числе 102 на иностранных языках), 74 рисунков и 17 таблиц.

# ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ НОРМАТИВНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СНЕГОВЫХ НАГРУЗОК НА ПОКРЫТИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

## 1.1 Общие положения

Наиболее важной нормативной климатологической информацией в строительстве являются данные об атмосферных нагрузках на здания и сооружения (которые традиционно содержались и содержатся в нормативной литературе). Снеговые нагрузки — это наиболее сложная разновидность атмосферных нагрузок, поскольку она касается самых различных объектов строительства (жилого фонда, энергетических сооружений, объектов военно-промышленного и сельскохозяйственного строительства). Следует также отметить, что образование снеговых нагрузок зависит от многих климатических факторов, учет которых требует специальных и достаточно сложных исследований. Вместе с тем, снег и связанные с ним процессы оказывают значительное влияние на хозяйственную деятельность, безопасность и доступность зданий и сооружений.

Численное моделирование снегонакопления было и остается актуальной вычислительной задачей вот уже почти 40 лет [156]. За годы исследований были разработаны разнообразные численные методы и подходы, постепенно приближающие ученых во всем мире к более точному описанию снегонакопления и определению более реалистичных с физической точки зрения форм снегоотложений. Для валидации разработанных численных моделей использовались, как правило, простые задачи, в отношении которых у исследователей имелись результаты натурального наблюдения и/или физического (экспериментального) моделирования (преимущественно в аэродинамических трубах), таких как, к примеру, обтекание отдельно стоящего куба [81, 130, 157, 160] или сплошного снегозадержателя [123, 160]. Апробация разработанных моделей проводилась на таких задачах, как снегонакопление на покрытиях зданий различной формы [108, 135, 154, 155, 159, 171] и вблизи зданий, сооружений или элементов ландшафта [82, 116, 129, 142, 147, 152, 153], но лишь некоторыми группами ученых. В каждом отдельно взятом случае

требовалось калибровать параметры используемых моделей для условий рассматриваемой задачи, хотя и этого не всегда оказывалось достаточно для того, чтобы можно было с уверенностью говорить о воспроизведении «реальных» снегоотложений [156]. Одной из основных причин тому является необходимость учета широкого спектра временных и пространственных масштабов, на которых происходит снегонакопление, ввиду участия в формировании снегового покрова частиц снега разных диаметров, не говоря уже об учете таяния и намерзания снега, обледенения, причем для произвольных направлений и скоростей ветра и геометрий зданий и сооружений. Однако в данной работе основной интерес представляет снегонакопление именно за счет снегопереноса – перераспределения снежных масс на покрытии под действием аэродинамических сил.

Явление такого рода называется эоловым процессом – возникающим под воздействием ветра, который переносит твердые частицы, называемые наносами (или седиментами). Одними из основополагающих трудов по механике эолового переноса, которые заложили фундамент практически для всех теоретических и практических разработок по моделированию снегонакопления, были труды Р.А. Багнолда [77, 78]. Эксперименты, анализ результатов которых представлен в этих работах, проводились автором в собственноручно построенной аэродинамической трубе. Несмотря на то, что сведения, изложенные в этих трудах, относятся к изучению перемещения песчаных дюн и барханов, многие из них оказались релевантны и для описания переноса ветром снега, хотя и с существенными дополнениями и, в ряде случаев, допущениями. Основным различием в переносе песка и снега ветром выступает тот факт, что песчинки не обладают свойством когезии, т.е. налипания, в отличие от снежинок. Ввиду налипания частиц, снегоперенос можно условно разделить на три подпроцесса – перекатывание, сальтацию и взвешивание (рисунок 1) [77, 156].

1) *Перекатыванию* – иначе ползучести – по поверхности подвержены крупные наносы (диаметром более 500  $\mu\text{m}$ ), сцепление которых с поверхностью сильнее сил ветра, пытающихся увлечь их в воздух;

2) *Сальтации* – или скачкообразному перескакиванию со скоростью в 2-3 раза ниже скорости потока – подвержены наносы среднего диаметра (70-500  $\mu\text{m}$ ). Частицы диаметром до 100  $\mu\text{m}$  подвержены так называемой модифицированной сальтации, возникающей под влиянием турбулентных вихрей над поверхностью. Масса материала, которую снеговетровой поток способен перенести в сальтирующем слое, рассчитывается по формуле (1).

3) *Взвеси* формируются из самых мелких наносов и подразделяются на краткосрочные (для частиц диаметром 20-70  $\mu\text{m}$ , возвращающихся назад в сальтирующий слой) и долгосрочные (диаметром менее 20  $\mu\text{m}$ , которые полностью уносятся потоком).

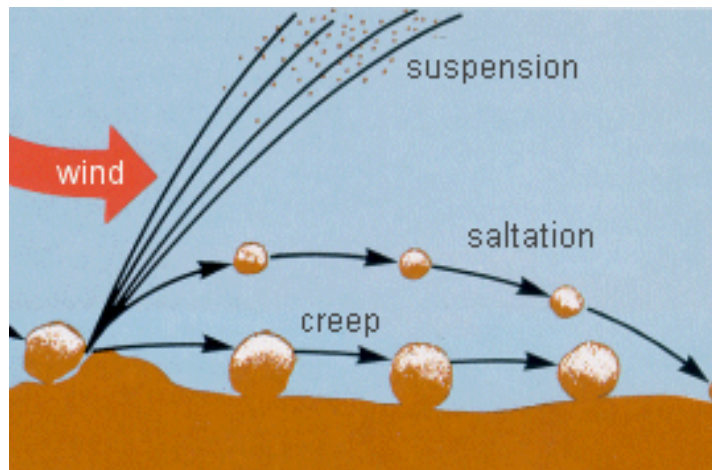


Рисунок 1 – Механика эолового процесса (из общего доступа)

В силу своей особой структуры, снежинки, участвующие во всех трех подпроцессах, сталкиваясь между собой, могут либо налипаться друг на друга, либо разбиваться, или даже разбивать другие частицы, влияя на снегоперенос, а макрообъекты, постепенно формируемые ими в процессе снегонакопления (например, сугробы), оказывают влияние на движение всего снеговетрового потока в целом. Обусловленная этим сложность процесса, исключительное число степеней свободы такой комплексной системы, стохастичность снегопереноса – лишь некоторые из естественных факторов, которые обуславливают применение статистических и приближенных методов расчета для описания физики данного явления. В точки зрения моделирования снеговых нагрузок, в прочем, наибольший интерес



представляют взвешенный и сальтирующий слои, поскольку именно эти подпроцессы вносят наибольший вклад в снегоперенос по покрытию.

Другой важный результат, впервые полученный Багнолдом, – формула для расчета массопереноса в сальтирующем слое, которая имеет вид:

$$q = C \frac{\rho_a}{g} \sqrt{\frac{d}{D}} u_*^3, \quad (1)$$

где:

$q$  [кг/м·с] – масса перенесенного снега вдоль единичной длины;

$C$  – безразмерная константа порядка единицы,

$\rho_a$  [кг/м<sup>3</sup>] – плотность воздуха;

$g = 9.81$  [м/с<sup>2</sup>] – ускорение свободного падения;

$d$  [μм] – референтный размер песчинки;

$D = 250$  [μм] – равномерный размер песчинок, использованный Багнолдом при проведении экспериментов;

$u_*$  [м/с] – скорость трения, выражение для которой имеет вид:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_a}}, \quad (2)$$

где:

$\tau_w$  [Па] – напряжение сдвига на стенке,

$\rho_a$  [кг/м<sup>3</sup>] – плотность воздуха.

Данная величина играет ключевую роль в моделировании снегонакопления, и вычисление ее значений является обязательным во всех известных численных моделях этого процесса.

Исследование снегопереноса было продолжено в работах М. Меллора (M. Mellor) [119], Н. Изюмовым и А.Г. Давенпортом (N. Isyumov, A.G. Davenport) [98-101], Д. Кобаяши (D. Kobayashi) [112], Д.Д. Иверсенем (J.D. Iversen) [102-105], Р.С. Андерсоном и П.К. Хаффом (R.S. Anderson, P.K. Haff) [70], С.Л. Гэмблом, У.У. Кочански и П.А. Ирвином (S.L. Gamble, W.W. Kochanski, P.A. Irwin) [92]. В частности, последняя группа ученых занималась вычислением средней длины пробега

частиц в сальтирующем слое: Багнолд полагал, что она равна 9 м [77], тогда как Андерсон и Хафф уменьшили ее до 4-8 м, а Гэмбл, наоборот, расширил до 5-10 м.

В работах Д.У. Помероя (J.W. Pomeroy), Д.М. Грэя (D.M. Gray) и Р.Д. Грейнджера (R.J. Granger) [133, 134] исследовались детали процесса снеготранспорта (накопление и перераспределение снеговых масс), таяния снега, влияния талой воды и промерзания слоев снежных масс на сход лавин в горных регионах. В работе Т. Уэматсу (T. Uematsu) и др. [160] была предложена одна из первых численных моделей для трехмерного расчета снеготранспорта, причем учтены также сальтация и взвешивание (отметим, что ползучесть в данной модели не учитывается). Следует отметить, что указанная модель позволяет рассчитывать только скорость, с которой происходит снеготранспорт, а не конечную высоту формирующегося снегового покрова (авторы работы отмечают, что к проблеме данного расчета необходимо подходить с осторожностью). В дальнейшем указанная модель получила свое развитие в ряде других публикаций ([102]). С помощью усовершенствованной модели стало возможным рассчитать равновесное снегонакопление, но она все еще не позволяла оценить время, необходимое для формирования снеготложений наперед заданной толщины. Р.С. Андерсон (R.S. Anderson) и П.К. Хафф (P.K. Haff), продолжая исследования Р.А. Багнолда по перемещению песчаных дюн, разработали модель эолового транспорта для сальтирующих песчинок [70]. Эта модель, в отличие от предыдущей, учитывает инерцию, однако ряд функций не подходит для снега в предложенном авторами виде и требует модификации.

Одной из важнейших работ предыдущего столетия, результаты которой вот уже 25 лет используются учеными разных стран, является статья М. Нэйма (M. Naaim), Ф. Нэйм-Буве (F. Naaim-Bouvet) и У. Мартинеза (H. Martinez) [123]. Указывая на недостатки моделей Т. Уэматсу и др. [160] и Д.Э. Листона и др. [114], а также на ограничения, не позволяющие использовать для изучения снеготранспорта модель Р.С. Андерсона и П.К. Хаффа [70] в ее оригинальном виде, авторы предложили собственный вариант модели уноса-отложения, в котором попытались улучшить достижения коллег, хотя и ценой целого ряда необходимых допущений

(среди которых, например, пренебрежение перекатывающимися частицами и учет только сальтирующих и, в меньшей степени, взвешенных).

В обзорной статье Й. Томинаги (Y. Tominaga) [156] приведен список большинства работ, посвященных вычислению снегопереноса и снегоотложений, опубликованных за последние десятилетия. Автор разделяет работы по размерности задач, способам моделирования турбулентности, взвеси и сальтации, а также по степени проведенной верификации.

Вопросам определения снеговых нагрузок на кровли зданий и сооружений, а также на грунт были посвящены работы и отечественных специалистов, в числе которых, в частности, можно указать А.Г. Алексеенко [3], А.П. Булычева [15, 16, 63], Ю.В. Генсиоровского [20, 21, 45], В.Н. Гордеева [22], И.Д. Грудева [23], М.В. Заварину [29, 30], Н.А. Казакова [20], Т.А. Корнилова [34, 52, 69], А.Т. Копылова [69], П.П. Кузьмина [19, 35], В.А. Лобкину [44-47], В.А. Отставнова [53-56], Н.А. Попова [58, 59], А.Р. Ржаницына [60], Л.С. Розенберга [55, 56], Д.М. Ротштейна [63], А.В. Рыкова [69], Б.П. Строкатова [67], В.В. Филиппова [69] и др.

Снег, падающий на пологое покрытие, в зависимости от скорости ветра частично или полностью сносится с крыши. На покрытиях пространственного типа снег с возвышенных участков сдувается в пониженные части покрытия, в так называемые снеговые мешки. Из-за накопления снега в снеговых мешках возможно обрушение покрытия. Проблеме сноса снега и перераспределения его ветровым по покрытию посвящены работы А.К. Дюнина [26, 27], Ю.М. Калужинского [38-40], А.А. Котова [41], В.А. Павлова [40, 42], В.Д. Райзера [59] и других исследователей. Закономерности формирования снегового покрова, его свойства и характеристики в европейской части России достаточно подробно исследованы также В.А. Отставновым, И.Д. Копаневым [33], В.И. Липовской [30, 43], Г.Д. Рихтером [61, 62], Н.К. Жуковой [28], В.М. Котляковым [18] и др.

Таяние снега зависит от подвода тепла к верхней и нижней поверхностям снежного покрова – соответственно к поверхностям раздела «снег - воздух» и «снег - покрытие». В литературе, посвященной снеготаянию, предполагается, что талые воды образуются главным образом на поверхности раздела «снег - воздух».

Поскольку таяние снега на покрытиях отапливаемых зданий происходит и за счет тепла выделяемого кровлей, то возникла необходимость в оценке таяния снега за счет тепла, подводимого к снежному покрову снизу. «Классическое» описание тепла через снежный покров, лежащий на покрытии отапливаемого здания, уравнением теплопроводности Фурье сталкивается с определенными трудностями. Определение входящего в уравнение теплопроводности Фурье коэффициента теплопроводности, осуществляемое на основании опытных данных, рассматривалось в работах Г.Ф. Абельса [1], Ц. Иосиды [164], М. де Кервен [24], А.С. Кондратьевой [32], И.В. Ледовского [36-42], М. Янсона [106] и др.

Вообще, среди нагрузок на строительные конструкции именно снеговые нагрузки являются наиболее изменчивыми и имеют большой статистический разброс. В течение зимы снеговая нагрузка на покрытие здания принимает неизвестные заранее значения, т.е. является случайной величиной. Также для снеговых нагрузок характерна изменчивость во времени. Накопление снега в рамках такого вероятностного подхода в течение зимы определяется как выборочная функция. Совокупность всех выборочных функций, описывающих накопления снега в течение ряда зим, представляет случайный процесс. Подход к изучению временных нагрузок с использованием теории нормальных стационарных случайных процессов был предложен в трудах отечественных ученых В.В. Болотина и А.Р. Ржаницына. Вместе с тем, накопление снега в течение зимы представляет собой нестационарный случайный процесс. Его моделирование встречает определенные трудности и изучается в работах И.В. Ледовского (см., например, [36]). Предметом его исследований являлись следующие вопросы: накопление снега на грунте в течение зимы; изменение снеговой нагрузки на покрытия зданий за счет переноса и сноса снега ветром; уменьшение снеговой нагрузки в результате таяния снега на покрытиях отапливаемых зданий. На основе моделей, описывающих свойства снеговых нагрузок, в диссертации И.В. Ледовского предложены методы нормирования снеговых нагрузок на покрытия зданий. Здесь в результате были разработаны: методика выявления тренда снеговых нагрузок в связи с глобальным потеплением климата; статистическая модель накопления веса снега на грунте в период устойчивого

снежного покрова; статистическая модель накопления снега на пологом покрытии с учетом сноса снега ветром; структурная модель снежного покрова, используемая для определения коэффициента теплопроводности снега; модель таяния снега на теплом покрытии отапливаемого здания; методика расчета нормативных и расчетных значений снеговой нагрузки на грунт и покрытия зданий.

Очевидно, что обеспечение эксплуатационной надежности конструкций зданий и сооружений в течении всего срока их эксплуатации, при минимальной материалоемкости несущих конструкций, во многом зависит от правильного назначения уровня снеговых нагрузок, поскольку доля снеговой нагрузки в общей нагрузке, действующей на конструкции покрытия, может достигать 90 процентов. Данная проблема особенно актуальна, например, для районов Крайнего Севера с длительным зимним периодом, длительному сохранению снежного покрова способствуют низкие температуры и отсутствие оттепелей.

Вообще, исследование нагрузок на здания и сооружения – это одна из главных задач строительной механики. Неоднократные обрушения покрытий строительных объектов из-за снеговой нагрузки привели к тому, что задача нормирования снеговых нагрузок на покрытия зданий и сооружений стала важнейшей, практически и теоретически значимой. Кроме того, эта задача, сама по себе, является трудной и обширной, и ее решение по ряду причин традиционно оказывалось недостаточным и далеким от исчерпания.

Характер перераспределения снега под действием ветра по покрытию здания или сооружения, как правило, очень сложен, вследствие чего соответствующие рекомендации по определению снеговых нагрузок получены лишь для определенных форм покрытий, конкретных местных условий, имеются частные рекомендации по схемам распределения снеговой нагрузки по покрытиям и соответствующему коэффициенту сноса снега.

Обобщение материалов аварий и результатов натурных обследований показывает, что для обеспечения надежности конструкций зданий и сооружений в ряде случаев (например, для некоторых строительных объектов, расположенных в районах Крайнего Севера) первостепенное значение имеет необходимость научно-

обоснованной формулировки нормативных требований к снеговой и ветровой нагрузкам. Стремление к унификации в отечественных нормах приводит к тому, что при нормировании снеговых нагрузок в один снеговой район включены территории с весьма большим разбросом снеговых нагрузок вследствие градации интервальных параметров. Согласно метеоданным, в некоторых районах Якутии годовые снеговые максимумы превышают расчетные значения веса снегового покрова на земле по строительным нормам в 1.5-2 раза. В отечественных и зарубежных нормах снос снега с покрытия здания определяются весьма приблизительно, а понижающий коэффициент не учитывает климатические условия эксплуатации зданий. В качестве основы определения снеговых нагрузок на здания и сооружения представляется целесообразно использовать подлежащие исследованиям, верификации и апробации модели и методы математического (численного) и компьютерного моделирования.

## **1.2 Обзор нормативных документов в части численного моделирования снеговых нагрузок на большепролетные покрытия**

Проблема вычисления снеговой нагрузки на покрытия произвольной формы остается актуальной до настоящего момента. В мире не проводится достаточного количества как натуральных испытаний, так и экспериментов по физическому моделированию для получения новых нормативных схем или уточнения старых. При этом моделирование в аэродинамических трубах или экспериментальных водостоках, регламентированное в большинстве нормативных документов за рубежом, позволяет исследовать только отдельные, частные случаи снегонакопления. Также до сих пор остается неразрешенной проблема подобия между естественным снегонакоплением и экспериментом в масштабе. Существенный прогресс в моделировании снегонакопления наблюдается почти исключительно в области численного моделирования [9], однако внедрение вычислительных методов в нормативные документы происходит не так быстро и не во всех странах мира. Таково положение дел в том числе и в отечественной строительной отрасли: не только российские нормативные документы остаются консервативными в части определения снеговых

нагрузок, не допуская применения численного моделирования, но и в принципе не предпринимается такого количества целенаправленных исследований, какое могло бы способствовать внедрению численного моделирования.

Такое положение дел зачастую вызывает у участников строительного процесса распространенное заблуждение о том, что нормативные положения незыблемы и отвечают на все возможные вопросы конструкторов и проектировщиков. Цель данного раздела – показать, что это далеко не так, и нормативные положения в части определения снеговых нагрузок в различных странах, равно как и схемы снеговых нагрузок (т.е., обычно, коэффициента формы) даже на примитивные типы покрытий, различаются и качественно, и количественно.

### *1.2.1 Сравнение положений нормативных документов*

В данном подразделе представлено сравнение основных положений в части расчета снеговых нагрузок в нормативных документах России (СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85\* Нагрузки и воздействия» [64]), стран Евросоюза (Eurocode 1: EN 1991-1-3 [88]), Канады (National Building Code of Canada [125]) и Соединенных Штатов Америки (ASCE/SEI 7-22: Snow Loads [74]).

Из немного общего в положениях норм можно выделить следующее:

1) Вычисление нагрузки производится по единому принципу. Нормативный вес снегового покрова на квадратный метр поверхности, значение которого берется из специальных карт снегового районирования, умножается на коэффициенты, модифицирующие это значение в зависимости от конфигурации кровли. В частности, одним из них является коэффициент перехода от веса снегового покрова на земле к снеговой нагрузке на покрытие (иначе – коэффициент формы).

2) Присутствуют собственно карты снегового районирования (как правило, в виде отдельного приложения к нормам), по которым следует определять значение нормативного веса снегового покрова для местоположения площадки строительства.

3) Для назначения коэффициента перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие приводятся схемы для некоторых стандартных

типов покрытий (в данной работе называемых примитивами): одно- и двускатных, купольных, цилиндрических, многопролетных (шедовых покрытий и пр.), а также схемы для определения высоты снеговых мешков у перепада высот и у парапетов.

4) Для определения снеговых нагрузок на все другие виды покрытий, которые не регламентируются нормами, рекомендуется выполнять физическое (экспериментальное) моделирование в аэродинамических трубах [75].

Говоря же о различиях в положениях нормативных документов, следует отметить, что в каждом из них представлен свой набор параметров, от которых зависит величина снеговой нагрузки (причем не всегда аналогичных между документами), а также существенно различается детализация карт снегового районирования. Некоторые нормы в исключительных случаях допускают применение численного моделирования для вычисления снеговой нагрузки, в то время как другие – не оговаривают или напрямую запрещают ввиду различных обстоятельств (например, нормы Канады). Также в некоторых документах присутствуют дополнительные схемы для коэффициентов перехода вдобавок к перечисленным выше.

В российском нормативном документе СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85\* Нагрузки и воздействия» (с изм. 1-4) [64], регламентирующем расчет значения снеговой нагрузки, дается следующая формула:

$$S_0 = \mu c_e c_t S_g, \quad (3)$$

где:

$c_e$  – коэффициент ветровой защищенности/учета сноса снега ветром;

$c_t$  – термический коэффициент;

$S_g$  [кН/м<sup>2</sup>] – нормативное значение веса снегового покрова на 1 квадратный метр поверхности;

$\mu$  – коэффициент формы, учитывающий переход от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие.

Для получения расчетной нагрузки значение, получаемое с помощью данной формулы, умножается на коэффициент надежности по нагрузке  $\gamma_f$ , равный 1.4. Значение коэффициента  $c_e$  стало возможным понижать с введением Изменения 3 (по климатическим данным с площадки строительства). Присутствуют схемы для



частных, зачастую редких случаев покрытий, которые оказываются избыточны с точки зрения других документов. Например, особое внимание уделено фонарям: даны схемы для продольных, поперечных фонарей. Также дана схема для зданий с двумя перепадами высот, с коническими круговыми покрытиями и покрытиями в виде сочетания сферической и конической поверхностей, для арочных покрытий и близких к сводчатым. Увеличение снеговой нагрузки у перепада высот в российских нормах, в отличие от других документов, вычисляется отдельно для верхнего и нижнего покрытия, причем направление ветра в снегонакоплении не учитывается. В отличие от численного моделирования ветровых нагрузок [94], российские нормы ничего не говорят о моделировании снеговых.

В Еврокоде [88] выделяют три типа снеговой нагрузки на покрытие: постоянную ( $s_1$ ), экстремальную от давления снега ( $s_2$ ) и экстремальную от снегопереноса ( $s_3$ ). Для расчета значений каждой из них приводятся следующие формулы:

$$s_1 = \mu C_e C_t s_k, s_2 = \mu C_e C_t s_{ad}, s_3 = \mu s_k, \quad (4)$$

где:

$C_e$  – коэффициент ветровой защищенности/учета сноса снега ветром;

$C_t$  – термический коэффициент;

$s_k$  [кН/м<sup>2</sup>] – нормативное значение веса снегового покрова на 1 квадратный метр поверхности;  $s_{ad} = 2s_k$ ;

$\mu$  – коэффициент формы, учитывающий переход от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие.

Как и в российских нормах, повышение снеговой нагрузки вблизи перепада вычисляется отдельно для верхнего и нижнего покрытия, направление ветра в снегонакоплении не учитывается. В отличие от российских и канадских нормативных документов, в Еврокоде допускается использование численного моделирования расчета снеговой нагрузки (п. 1.5), однако никаких конкретных требований к применяемым методам, кроме корректной валидации, не содержится.

В Национальных строительных нормах Канады [125] приводится следующую формулу для вычисления нормативного значения снеговой нагрузки:

$$S = I_s S_g (C_b C_w C_s C_a), \quad (5)$$

где:

$I_s$  – коэффициент надёжности по ответственности здания;

$S_g$  [кН/м<sup>2</sup>] – нормативный вес снегового покрова на 1 квадратный метр поверхности;

$C_w$  – коэффициент ветровой защищенности/учета сноса снега ветром;

$C_a$  – коэффициент накопления снега на покрытии;

$C_b$  – базовый коэффициент формы;

$C_s$  – коэффициент уклона крыши.

Здесь коэффициенты  $C_b$ ,  $C_s$  и  $C_a$  совместно выступают в роли аналогов коэффициента формы  $\mu$  из СП 20.13330.2016 и Еврокода. В отличие от других нормативных документов, канадские нормы явно выделяют направления ветра, при которых рассматривается снегонакопление, и рекомендуют рассчитывать величину снеговой нагрузки для наветренной и подветренной сторон отдельно. Затем, впрочем, рекомендуется выбирать наибольшее из рассчитанных значений и назначить в запас для обеих сторон. Также строительные нормы Канады явно и напрямую запрещают применение численного моделирования ввиду недостаточно хорошо разработанной методологии и отсутствия свидетельств в пользу достоверности получаемых с его использованием результатов.

В нормативных документах Американской ассоциации строителей [74] дается следующая формула для вычисления нормативного значения снеговой нагрузки:

$$p_f = 0.7 C_e C_t I_s p_g, \quad (6)$$

где:

$C_e$  – коэффициент ветровой защищенности/учета сноса снега ветром;

$C_t$  – термический коэффициент;

$I_s$  – коэффициент надёжности по ответственности здания;

$p_g$  [кН/м<sup>2</sup>] – нормативный вес снегового покрова на 1 квадратный метр поверхности.

Для зданий с пологими крышами существует отдельное понятие минимальной нагрузки, которую рекомендуется рассчитывать по формуле:

$$p_m = I_s p_g, \quad (7)$$

а для неравномерной нагрузки используется формула:

$$p_s = C_s p_f, \quad (8)$$

где  $C_s$  – коэффициент формы покрытия.

Как и в канадских нормативных документах, стандарт ASCE явно выделяет отдельные направления ветра, при которых происходит снегонакопление, рекомендует рассчитывать снеговую нагрузку для наветренной и подветренной сторон отдельно и назначать наиболее значение в запас для обеих сторон. В отличие от других рассмотренных документов, в стандарте явно прописано, что использование результатов физического (экспериментального) моделирования для назначения расчетных снеговых нагрузок возможно только вместе с численным (математическим) моделированием, и одних экспериментальных испытаний для исследования снегонакопления на покрытии недостаточно. В Приложении [75] приведена отдельная классификация методов численного моделирования. Наконец, ввиду наличия вблизи почти каждого аэропорта в США метеорологической станции, стандарт ASCE отличается самой детальной картой снегового районирования среди рассмотренных нормативных документов.

В целом нужно сказать, что расхождения между рассмотренными документами во многом обусловлены больше традицией инженерной практики конкретных стран, исходя из которых формируются нормативные документы. Так, в одних стандартах нормативный вес снегового покрова рекомендуется брать в запас, иногда даже сильно; в других – максимально уточнять для экономической эффективности строительства. Общим существенным недостатком рассмотренных документов является недостаточная или полностью отсутствующая легитимизация и регламентация численного моделирования для расчета снеговых нагрузок. Данное обстоятельство является одним из наиболее существенных тормозящих факторов на пути внедрения численного моделирования практику строительства на фоне увеличения потребности в его реализации и нарастающих темпов проведения научных

исследований по этому направлению в таких странах, как Китай, где за последние годы вышли многочисленные статьи с результатами исследований (в частности, [108, 162, 167-171]), которые были проведены при поддержке правительственных грантов.

### 1.2.2 Пример вычисления снеговой нагрузки на трехуровневую кровлю

Для демонстрации различий в нормативных значениях снеговой нагрузки, определяемых по нормативным документам России [64], Евросоюза [88], Канады [125] и США [74], приводится пример трехуровневой кровли (рисунок 2). Расчетные формулы и значения участвующих в них величин и коэффициентов приведены в таблице 1. Результаты вычислений представлены в виде эпюр на рисунках 3-6.

Таблица 1 – Формулы для вычисления снеговой нагрузки согласно основным нормативным документам различных стран

Нормативный документ	Формула для вычисления снеговой нагрузки	Значения, принятые в формулах
СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» (с изм. 1-4) [64]	$S_0 = \mu c_e c_t S_g$	$c_e = 0.7$ для центральной кровли, $c_e = 1.0$ для боковых кровель, $c_t = 1.0$ , $S_g = 1.5$ кПа
Eurocode 1: EN 1991-1-3 (2003) [88]	$s_1 = \mu C_e C_t s_k$ – постоянная; $s_2 = \mu C_e C_t s_{ad}$ – экстремальная; $s_3 = \mu s_k$ – от снегопереноса	$C_e = 0.8$ , $C_t = 1.0$ , $s_k = 1.5$ кПа, $s_{ad} = 2s_k = 3$ кПа
National Building Code of Canada (2015) [125]	$S = I_s S_s (C_b C_w C_s C_a)$	$I_s = 1.0$ , $C_w = 1.0$ , $C_s = 1.0$ , $S_s = 1.5$ кПа
ASCE/SEI 7-22: Snow Loads [74]	$p_f = 0.7 C_e C_t I_s p_g$ $p_m = I_s p_g$ – минимальная $p_s = C_s p_f$ – неравномерная	$C_e = 0.9$ , $C_t = 1.0$ , $I_s = 1.1$ , $p_g = 0.96$ кПа (аналог $S_g$ )

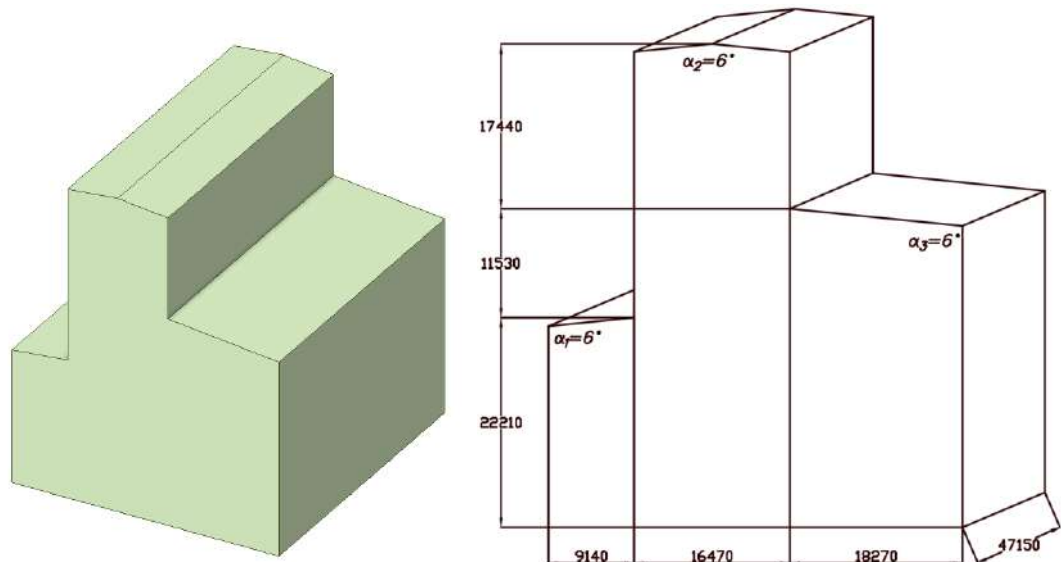


Рисунок 2 – Изометрический вид и размеры исследуемого сооружения

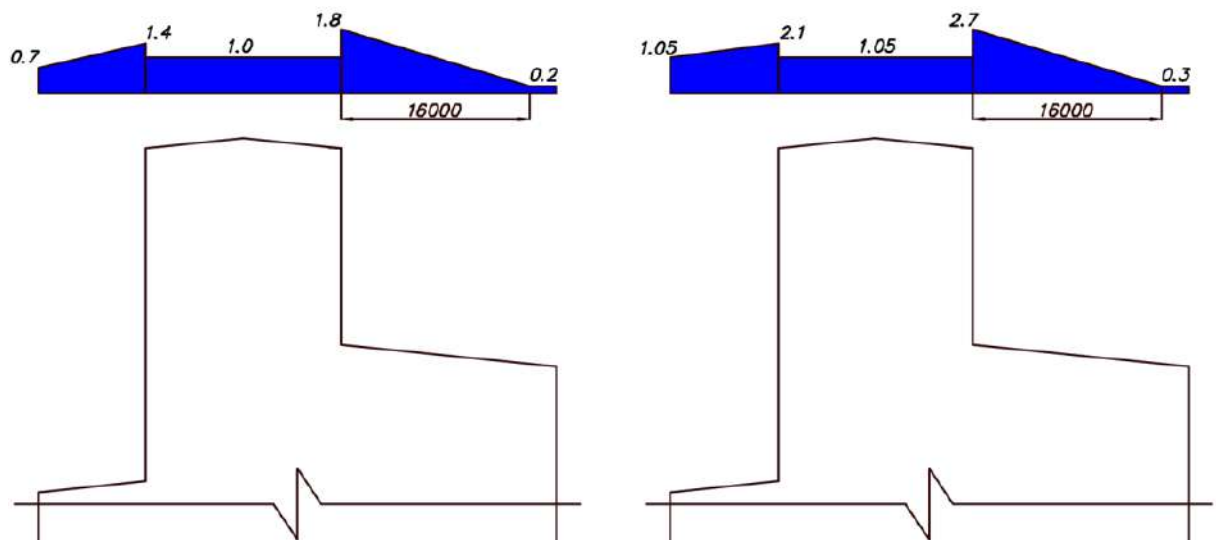


Рисунок 3 – Нормативное значение снеговой нагрузки, вычисленное с помощью СП 20.13330.2016 (с изм. 1-4)

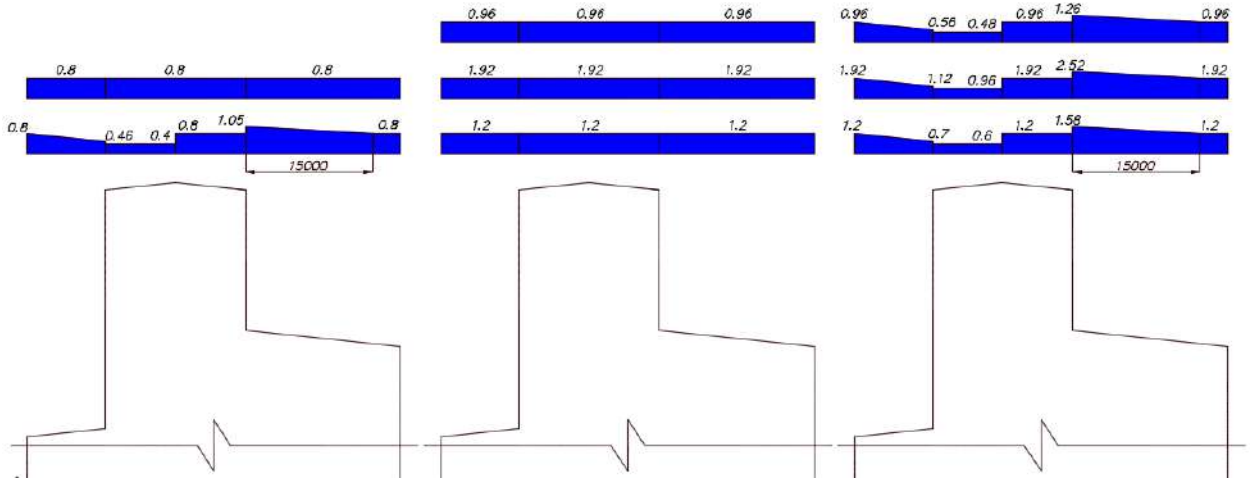


Рисунок 4 – Нормативное значение снеговой нагрузки, вычисленное с помощью EN 1991-1-3 (2003)

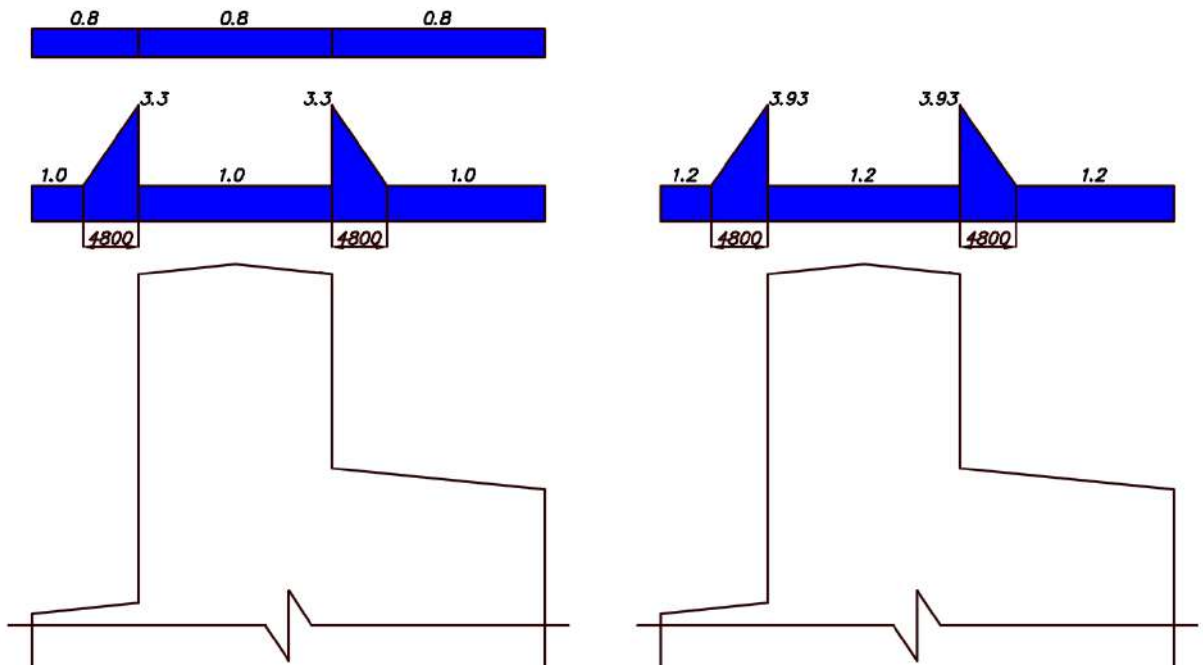


Рисунок 5 – Нормативное значение снеговой нагрузки, вычисленное с помощью National Building Code of Canada (2015)

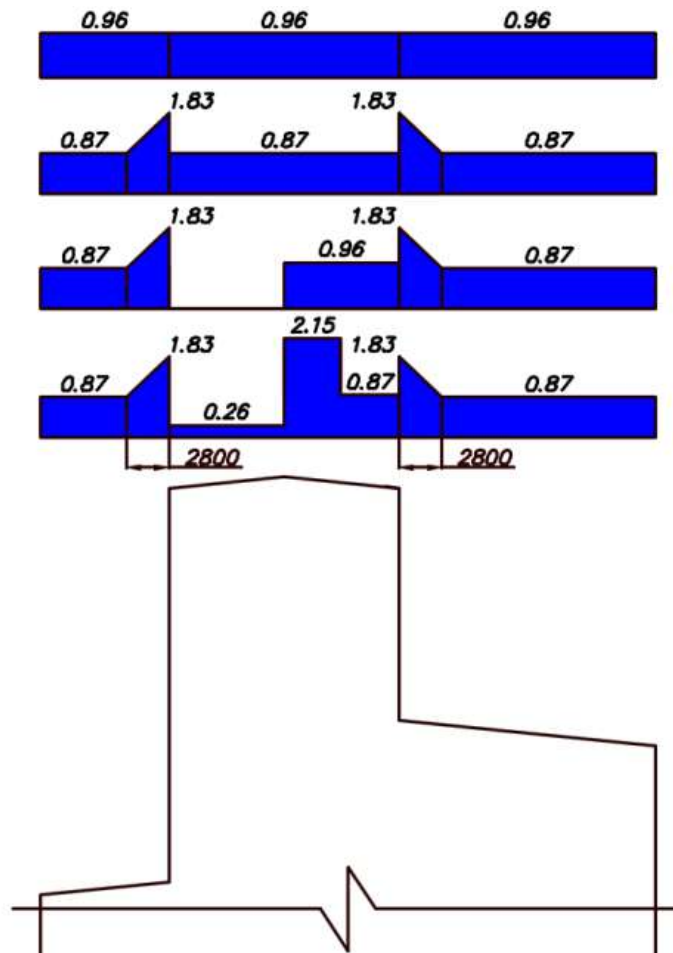


Рисунок 6 – Нормативное значение снеговой нагрузки, вычисленное с помощью ASCE/SEI 7-22: Snow Loads

### 1.3 Обзор исследований снеговых нагрузок экспериментальными методами

#### 1.3.1 Общие сведения

По-видимому, первой областью, в которой применялось физическое (экспериментальное) моделирование снегонакопления и снегопереноса в аэродинамических трубах, стало проектирование автомобильных дорог. С 1930-х годов ученые занимались совершенствованием устройства снегозадержателей и прочих мероприятий по ограждению дорог от экстремальных снеговых наносов. В 1934 г. Финни [89] опубликовал обобщил имевшиеся на тот момент данные по этой проблеме и дополнил их результатами своих экспериментов, проводившихся в Государственном Университете Мичигана. Впоследствии также вышли его рекомендации по устройству ограждений на высокоскоростных трассах [90]. В этих исследованиях многие известные сегодня тонкости физического моделирования остались

пока еще не затронутыми, однако заложили фундамент для дальнейшего развития экспериментов в аэродинамических трубах. Работу Финни, в частности, продолжал Таблер [148], некоторые результаты которого были адаптированы и для моделирования снегонакопления в строительстве. В 1960-х большой вклад в моделирование снегопереноса и в развитие вопросов теории подобия внес Одар [126, 127], с 1970-х моделированием снегонакопления на покрытиях зданий и сооружений занимались Изюмов и Давенпорт [98-101], теорию подобия продолжил развивать Иверсен [102-105]. В 1980-х годах Кинд [109-111] занимался обобщением известных на тот момент методов физического моделирования и самостоятельными исследованиями сальтирующего слоя снегопереноса, выходили работы Анно [71-73] по моделированию с использованием частиц глины. В 1990-х вышли работы Ирвина [93-96], выполненные на стыке физического и численного моделирования.

Одной из наиболее полных и всесторонне исследующих проблему назначения снеговых нагрузок на покрытия зданий и сооружений работ, включающей в себя аналитический обзор предыдущего опыта, описание и глубокий анализ выполненных авторами экспериментальных результатов, является научно-технический отчет по разработке раздела 1-3 “General actions – Snow loads” Еврокода [139, 140]. В этой работе затрагиваются многие аспекты нормативной регуляции снеговых нагрузок: уточнение и дополнение карт снегового районирования территории Евросоюза, сочетание нагрузок, совершенствование схем коэффициента формы. Большая часть отчета посвящена натурным измерениям снегонакопления на покрытиях зданий и сооружений в определенных локациях Европы, выбранных исследователями для как разработки карт районирования, так и схем коэффициента формы. Впрочем, ввиду короткого периода наблюдений (один сезон), малоснежной зимы и ряда других факторов, многие из полученных данных оказались нерепрезентативными. С достаточной достоверностью была исследована зависимость коэффициента формы только от угла наклона покрытия, скорости ветрового потока и температуры. В связи с этим были проведены и подробно описаны эксперименты, выполненные с использованием реального снега, создаваемого снеговой пушкой, и крупномасштабных моделей (1:10) в климатическом контуре аэродинамической



трубы “Jules Verne” центра CSTB (Франция), а также методология, в соответствии с которой обрабатывались их результаты. Оборудование такой трубы позволяет тонко настраивать температуру и влажность в рабочей части для подбора оптимальных условий моделирования и их сохранения на протяжении многих продувок, а также устраняет необходимость выбора подходящего снегоимитатора. Исследование снегонакопления на покрытиях проходило в два этапа. На первом моделировалось равномерное распределение на низкой скорости ( $< 1$  м/с) с помощью специального щита, отклонявшего снеговетровой поток таким образом, чтобы имитировать снегопад без существенного снегопереноса. Затем, в отсутствие щита и на более высокой скорости ( $\sim 4$  м/с) моделировалось неравномерное распределение под сильным влиянием снегопереноса. Такой подход позволил получить широкий набор достоверных картин распределения снега по широкому диапазону форм покрытий. Следует отметить, что, несмотря на его методологическую корректность, этот подход принят далеко не всеми экспериментаторами. Зачастую для исследования снегонакопления на покрытии проводится только одна продувка для данного направления ветра – на высокой скорости, для моделирования снегопереноса, в то время как равномерное распределение выполняется самими экспериментаторами перед началом продувки.

В целом, благодаря детальному описанию условий и результатов экспериментов, материалы, представленные в этом отчете, не только демонстрируют сложность, с которой сопряжено проведение качественного физического эксперимента, но и представляют богатую верификационную и валидационную базу для исследователей. Также выполненные учеными исследования экспериментально подтвердили то, что набегающий снеговетровой поток уплотняет снеговой покров на наветренной стороне здания, в результате чего снеговая нагрузка существенно увеличивается. Подавляющее большинство снегоимитаторов не способно воспроизвести этот эффект.

Масштабные эксперименты по моделированию снегонакопления и снегопереноса обычно разделяют на две категории (например, в [75]):

1) Методы частиц. Реализуются в стандартных и климатических аэродинамических трубах или специальных экспериментальных водостоках (“water flume”, иначе – гидрлотках). С их помощью снегоперенос и снегонакопление явно моделируются с помощью снега или снегоимитаторов путем введения их в воздушный поток [122].

2) Неявные методы. Реализуются путем исследования обтекания масштабной модели ветром с вычислением его скоростей над покрытием, после чего снегоперенос и снегонакопление рассчитываются численно на основании климатических данных площадки строительства.

С применением достаточно распространенных в зарубежной практике водостоков моделируется преимущественно снегоперенос (например, канадской лабораторией RWDI, которая, в частности, занималась определением снеговых нагрузок на покрытие Открытие Арены [76]). Макет исследуемого объекта помещают в специальный водосток (рисунок 11, слева), после чего по нему пропускают воду с введенным в нее снегоимитатором – песком [85, 86, 93] или дробленой ореховой скорлупой [115]. Ученые по-разному интерпретируют физичность получаемых распределений (рисунок 11, справа), однако водосток используется в первую очередь для определения мест потенциального образования сугробов, а не для назначения расчетных схем снеговых нагрузок. Полученные результаты затем обрабатываются численно.

В силу сложности технического устройства климатических аэродинамических труб, большинство экспериментаторов для физического моделирования снегонакопления и снегопереноса прибегает к использованию снегоимитаторов в стандартных аэродинамических трубах. Введение имитатора в ветровой поток также сопряжено с рядом проблем, которые могут повредить внутреннему устройству трубы, поэтому обычно при проведении эксперимента ограничиваются нанесением материала на поверхность макета и, фактически, моделируют только снегоперенос. Погодные явления из разряда «бесснежных ураганов» не способствуют образованию наибольших снеговых нагрузок, поскольку под действием ветра общее количество снежной массы на покрытии уменьшается, и интегральное значение веса

снегового покрова на покрытие падает. Поэтому реализация такого подхода может быть объяснена (но не оправдана) исключительно техническими препятствиями, но не методологическими особенностями научного подхода.

### 1.3.2 Метод частиц и снегоимитаторы

При реализации методов частиц могут применяться самые разнообразные снегоимитаторы: кусочки глины [72], шарики из пенопласта [91, 113] (рисунок 12, 13) или стекла [102], опилки или древесная мука (рисунок 11) [123, 168], рисовые отруби [98], пищевая сода [144], кварцевый песок (рисунок 14) [162], а также более сложные соединения типа полиакрилатов и тетрабората натрия [137, 165].

Экспериментаторами неоднократно проводились работы по сравнению свойств снегоимитаторов ввиду их широкого разнообразия. Так, при прочих равных условиях внутри аэродинамической трубы в работе [169] сравниваются между собой зола, кварцевый песок и пенопласт. По результатам исследования для выбранной задачи наилучшее соответствие с натурными данными продемонстрировало применение кварцевого песка. В отечественной практике широко распространено использование древесной муки, применяемой в подавляющем большинстве аэродинамических труб.

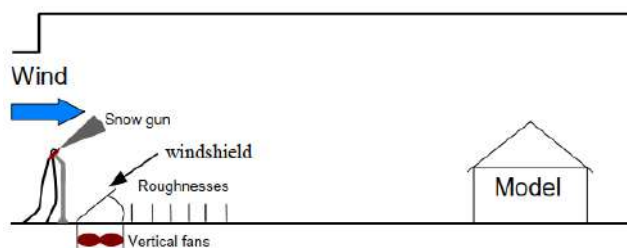
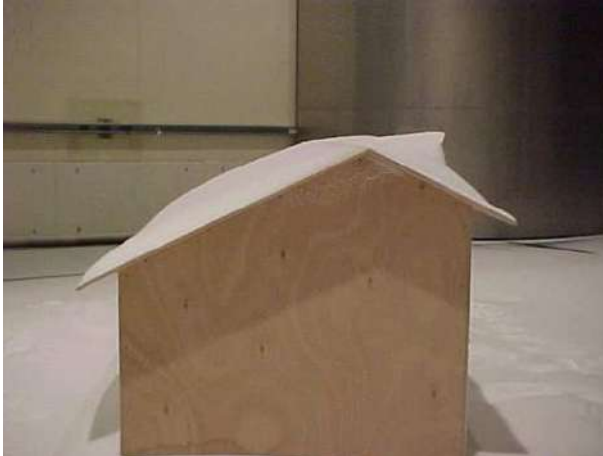


Рисунок 7 – Схема рабочей части климатического контура аэродинамической трубы “Jules Verne” центра CSTB (Франция) с установкой для физического (экспериментального) моделирования снегонакопления и снегопереноса (слева) и процесс эксперимента (справа) [139, 140]



двускатное покрытие со слуховым  
окном и козырьками

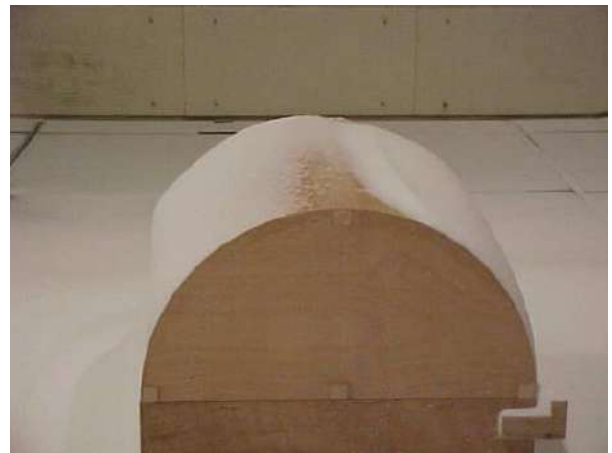


двухуровневое покрытие

Рисунок 8 – Результаты физического (экспериментального) моделирования  
снегонакопления и снеготранспорта в климатическом контуре  
аэродинамической трубы CSTB [139, 140]



многопролетное здание  
с двускатными покрытиями



сводчатое покрытие

Рисунок 9 – Результаты физического (экспериментального) моделирования  
снегонакопления и снеготранспорта в климатическом контуре  
аэродинамической трубы CSTB [139, 140]



фирма УНИКОН



УНПЛ ААИСК НИУ МГСУ

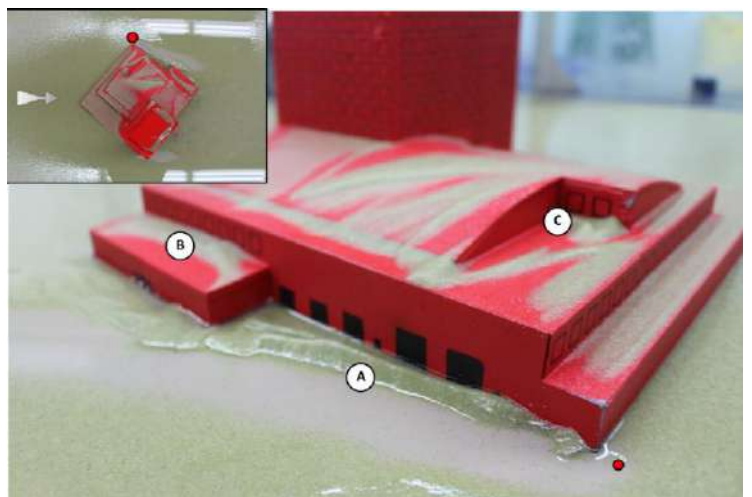


НИИ механики МГУ

Рисунок 10 – Результаты физического (экспериментального) моделирования  
снегонакопления в некоторых отечественных аэродинамических трубах



перед экспериментом



результат эксперимента

Рисунок 11 – Результаты физического (экспериментального) моделирования  
снегопереноса в водостоке [76]



Согласно рекомендациям Американской ассоциации строителей [75], результаты физического (экспериментального) моделирования с использованием метода частиц должны носить только качественный характер и при назначении расчетных значений снеговой нагрузки использоваться исключительно в сочетании с рекомендациями нормативных документов для простейших типов покрытий (примитивов), данными натурных наблюдений и климатической информацией для площадки строительства. Тем не менее, некоторые отечественные рекомендации по назначению снеговых нагрузок не содержат в себе такого комплексного подхода, иногда и вовсе предлагая назначать расчетные значения нагрузок на основании оцифровок распределения снегоимитатора по покрытию по результатам продувок (рисунок 15).

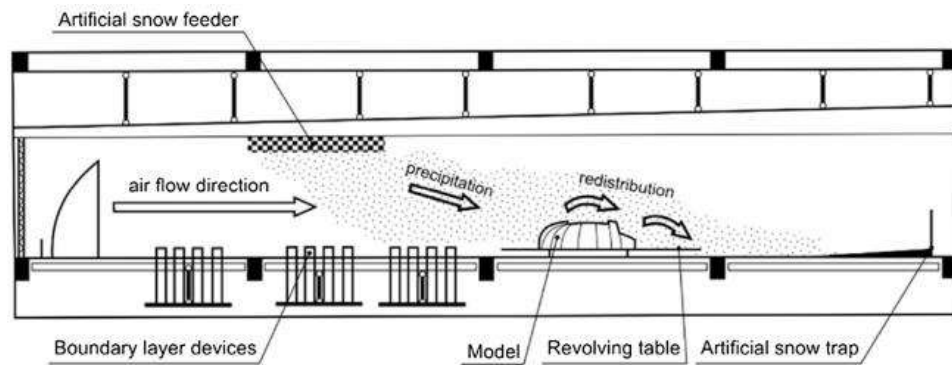
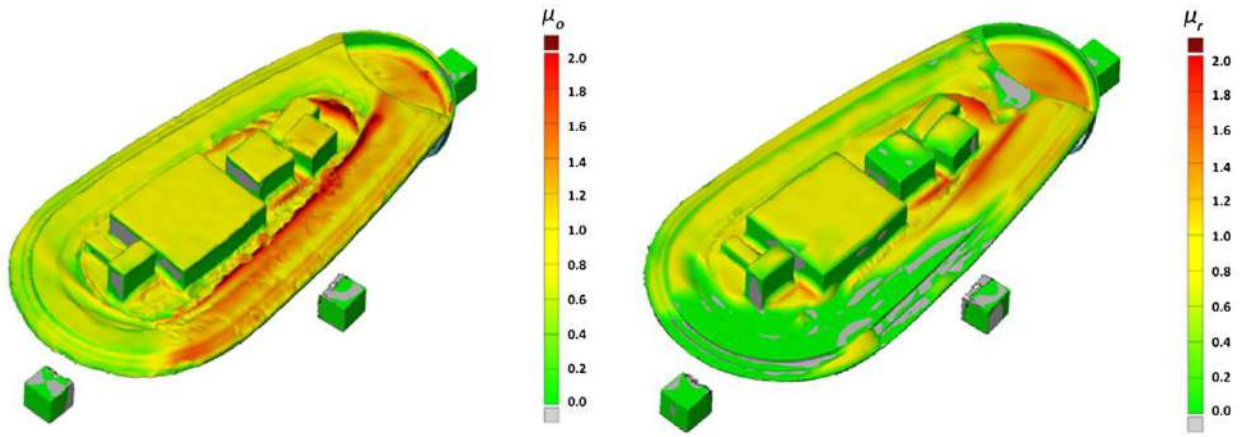


схема установки для проведения физического моделирования



обработка результатов моделирования (3D-сканирование)

Рисунок 12 – Физическое (экспериментальное) моделирование снегонакопления и снеготранспорта с применением пенопласта в качестве снегоимитатора [91]



физически моделируемый  
коэффициент формы  $\mu$   
(снегонакопление)

физически моделируемый  
коэффициент формы  $\mu$   
(сногперенос)

Рисунок 13 – Физическое (экспериментальное) моделирование снегонакопления с применением пенопласта в качестве снегоимитатора [91]

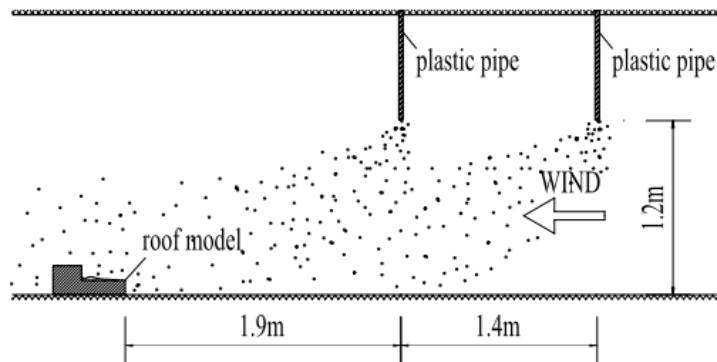
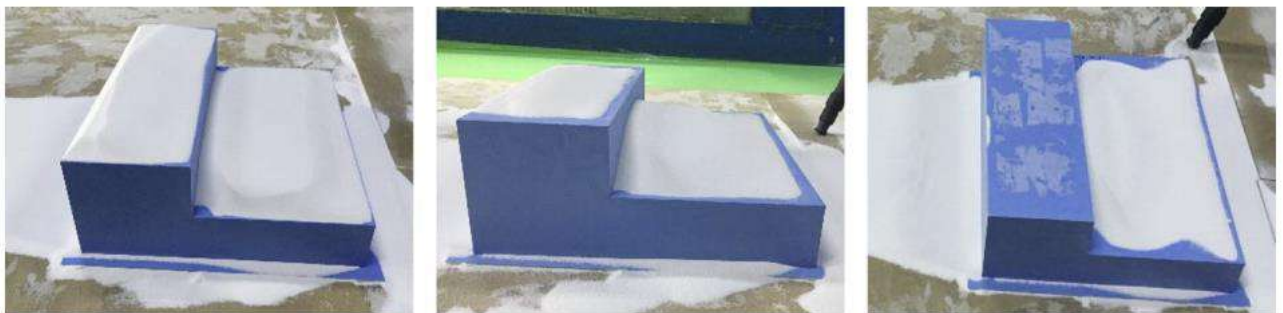
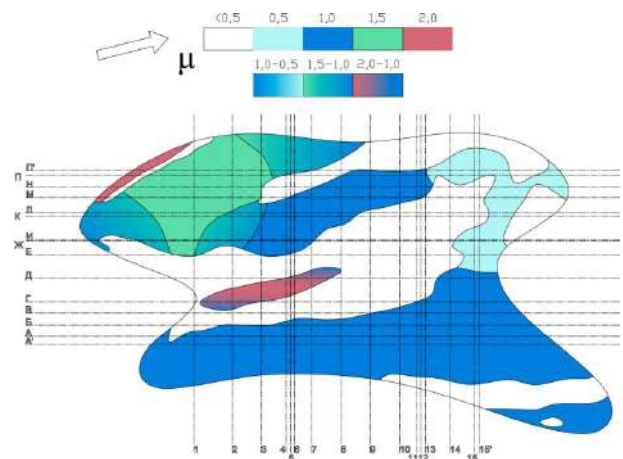


схема установки для проведения физического моделирования



результаты моделирования при увеличивающейся (слева направо) скорости ветра  
Рисунок 14 – Физическое (экспериментальное) моделирование снегонакопления и сногпереноса с применением кварцевого песка в качестве снегоимитатора [162]



моделируемый коэффициент формы  $\mu$   
(распределение снегоимитатора)

расчетный коэффициент формы  $\mu$   
по результатам моделирования

Рисунок 15 – Пример назначения расчетного коэффициента формы  $\mu$  по результатам физического (экспериментального) моделирования, выполненного ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Важным недостатком метода частиц является моделирование, фактически, только единичных снегопадов, в то время как основной интерес представляет постепенное снегонакопление на протяжении всего холодного периода (на протяжении многих месяцев) под влиянием ветра с различных направлений. Для этого рекомендации Американской ассоциации строителей [75] предлагают использовать неявные методы [131], обрабатывая результаты физического моделирования с помощью численного. Они выделяются в две категории. Первый метод (А) предполагает определение наиболее опасных с точки зрения снегонакопления (и с учетом климатических данных) углов атаки ветра без использования снегоимитатора, а второй (В) – последующее физическое моделирование только для определенных углов. При этом экспериментальные результаты используются только в качестве начальных условий для численного моделирования.



### *1.3.3 Физическое моделирование как инструмент создания численных моделей*

Создание методик численного моделирования снегонакопления и снегопереноса неразрывно связано с проведением мероприятий по натурному наблюдению физическому моделированию. Многие параметры, которые существуют в математических моделях поведения снега, требуют калибровки по натурным и экспериментальным данным для получения достоверных картин снегонакопления (зачастую – отдельной для каждой конкретной задачи).

Развитие современных численных моделей снегонакопления и снегопереноса сопряжено с развитием методов вычислительной гидрогазодинамики (CFD), одним из основных требований к применению которых является верификация и валидация результатов (V&V). Проверки по данным наблюдений и экспериментов требуют модели турбулентности, численные схемы, функции стенки – и модели снегонакопления не являются исключением. Использование верифицированных и валидированных CFD-методов позволяет рассчитывать поведение снеговетрового потока для корректного моделирования сальтирующего и взвешенного слоев снегопереноса [128].

Основные эмпирические закономерности снегопереноса были получены в XX веке американскими [103] и канадскими [133] исследователями, хотя их результаты и не оказались универсальными. Такеучи [149] занимался исследованием снегозадержателей и проводил измерения продольной скорости снегопереноса в сальтирующей и взвешенной зонах. Таблер [148], продолжая работу Финни [89, 90], занимался проектированием дорожных ограждений и вопросом перераспределения снегоотложений по мере движения зоны осадков.

Особое значение при моделировании пристеночного слоя (в котором и начинается процесс снегонакопления) имеет шероховатость, поскольку от него напрямую зависит вязкость течения и, следовательно, структура турбулентных вихрей вблизи покрытия. Вопросами шероховатости покрытий, на которых происходит снегонакопление и снегоперенос, занимались экспериментаторы из экспедиции SANAE IV [79] и программы ALW [83].

### *1.3.4 Анализ и обработка результатов эксперимента*

Отдельный вопрос, помимо непосредственно способа проведения эксперимента, представляет количественная оценка полученных с его помощью результатов, поскольку конечной целью их выполнения является вычисления физически моделируемого коэффициента формы для дальнейшего назначения расчетного коэффициента формы. Детали этих процедур сложно отнести основным аспектам данной работы, однако общее понимание того, какая методология стоит за обработкой результатов моделирования, позволяет понять преимущества и недостатки применяемых методов и то, каким образом их можно было бы улучшить.

Проведение натуральных наблюдений за реальными объектами сопряжено с рядом известных трудностей – высокой ценой технически сложного оборудования, необходимостью долгосрочного мониторинга, в целом высокими трудозатратами. Однако даже простейшие, но регулярные замеры высоты снегового покрова на покрытиях и вблизи зданий и сооружений в холодный период уже могли бы принести пользу. Создание с помощью этих данных базы наблюдений за различными типами покрытий, в которых были бы указаны год измерения, местоположение и некоторые метеорологические сведения, существенно поддержало бы развитие методов как физического, так и численного моделирования, позволило бы развивать нормативные рекомендации и формировать представление о физических формах снегоотложений у конструкторов, проектировщиков и расчетчиков. Помимо замеров высоты снегового покрова, на сегодняшний день доступна и периодическая видеосъемка покрытий. Обработанные современным программным обеспечением фотографии кровель с распределениями снега стали бы аналогом атласов, традиционно составлявшимся гидрогазодинамиками для различных типов течений [10, 17, 68, 84]. Более того, существующие численные методы позволяют получать из фотографий трехмерную информацию о распределении снега по покрытию с высокой точностью [87], что позволяет минимизировать или полностью ликвидировать необходимость в ручных замерах [140], что может представлять определенные сложности. Наконец, как сегодня количественные и качественные данные о

снегонакоплении возможно подвергнуть обработке искусственным интеллектом для прогнозирования распределения снега на проектируемых типах покрытий [138].

Аналогичные способы обработки натуральных результатов возможно применять и для обработки экспериментальных результатов [163], хотя на сегодняшний день приоритетным является применение 3D-сканирования [91]. Использование лазерного луча сканера позволяет выполнять измерения, не возмущая слой снега или снегоимитатора, нанесенный на исследуемый макет, обеспечивает исключительно высокую точность измерений, а также открывает возможности для автоматизации процесса обработки результатов. До появления и распространения подобных приборов (или ввиду невозможности технического оснащения лаборатории одним из них) исследователям приходилось прибегать к более простым, но существенно менее точным методам. Например, в уже упомянутой работе [139, 140] для получения формы снегоотложений использовался простейший способ: в нанесенный на макет снег аккуратно погружали кусок картона и обводили уровень вручную. Другим распространенным способом являются точечные измерения с помощью линейки с последующей интерполяцией полученных высот снегового покрова по покрытию на основании фотографий результатов эксперимента. Однако, учитывая масштабы большинства популярных снегоимитаторов и погрешность выполняемых измерений, достоверность получаемых таким образом величин требует тщательных проверок. Для исследования сальтирующего и взвешенного слоев снегопереноса обычно применяются счетчики частиц [141], с помощью которых можно количественно оценить величину потока массопереноса в точке.

## Выводы по главе 1

1. По результатам сравнительного анализа нормативных документов России, Евросоюза, Канады и США в части вычисления и назначения снеговых нагрузок на покрытия зданий и сооружений, а также сопоставления полученных с их помощью эпюр снеговых нагрузок на трехуровневую кровлю, можно сделать следующие выводы:

1.1. Все нормативные документы имеют собственный общий подход к определению снеговых нагрузок, существенно отличающихся от других стран.

1.2. Во всех нормативных документах даны рекомендации по проведению физического моделирования снеговых нагрузок, но рекомендации по численному моделированию содержатся только в нормах Евросоюза и США.

1.3. Нормативные схемы значений коэффициента формы даже для простейших покрытий отличаются в различных документах как качественно, так и количественно.

2. Таким образом, вскрывается общая проблема отсутствия прогресса в едином понимании, как определять снеговые нагрузки на покрытия. Даже нормативные документы не могут дать однозначно надежного ответа на этот вопрос.

3. Проведен аналитический обзор истории развития и текущего состояния методов физического (экспериментального) моделирования снегонакопления и снегопереноса по научным публикациям и рекомендациям нормативных документов, а также критический анализ отечественных работ по этой тематике.

4. Проведенный обзор показал, что выполняемые в РФ экспериментальные работы в аэродинамических трубах с целью определения коэффициента формы  $\mu$  методологически находятся на удручающе низком уровне, даже по сравнению с иностранными работами полувековой давности:

4.1. В отечественных работах в аэродинамических трубах фактически не моделируются отдельные снежные ураганы или снегопады, а моделируется снос равномерного слоя снега с покрытия во время сильного ветра. Такой упрощенный, малореалистичный подход не используется ни в одной иностранной лаборатории, признанной научным мировым сообществом или регулирующими органами.

4.2. Неясен повсеместный выбор древесной муки в качестве снегоимитатора, несмотря на лучшее соответствие натурным данным в ряде случаев кварцевого песка по данным различных исследований.

4.3. Референтное значение толщины снегового покрова, необходимое для расчета коэффициента формы  $\mu$ , выбирается произвольно и безосновательно. Референтная толщина снега может быть определена по толщине «снегового» покрова вдали от модели (или при продувке без модели) при моделировании выпадения снега, либо в сравнении с эталонной стандартной моделью простой формы, которая располагается рядом с исследуемой. В отечественных лабораториях эти подходы не используются.

4.4. Рекомендации по назначению расчетного коэффициента формы  $\mu$  «изготавливаются» по результатам элементарной оцифровки картин оставшегося на покрытии снегоимитатора. В ряде случаев эти картины явно противоречат физическим соображениям – никто не видел подобных картин снегонакопления в действительности. Такой подход прямо противоречит иностранным стандартам, где четко указано, что получаемые картины должны использоваться в качестве дополнительных данных для последующего анализа и моделирования.

4.5. Моделирование в аэродинамических трубах или экспериментальных водостоках позволяет воспроизвести условия снежного урагана или единичного снегопада. Бездумное использование результатов этих экспериментов в рекомендациях приводит к тому, что распределения снега, формируемые весь холодный сезон многими снегопадами, различными направлениями ветра, тепловыми и влажностными режимами, совершенно не учитываются.

4.6. Такой подход ставит под серьезное сомнение легитимность разрабатываемых рекомендаций и несет значительные риски для механической безопасности уникальных большепролетных зданий и сооружений.

5. СП 20.13330.2016 предписывает для зданий и сооружений с габаритными размерами превышающими 100 м, а также в случаях, не предусмотренным приложением Б, проводить модельные испытания в аэродинамических трубах с целью определения коэффициента формы  $\mu$ . При этом почему-то не допускается

проведение испытаний в экспериментальных водостоках, подходе совершенно равноценном и признаваемым (как в нормах, так и в научных публикациях) во всем развитом мире наравне с аэродинамическими трубами.

6. Одновременное выполнение всех условий подобия для моделирования процессов снеготранспорта и снеготложения невозможно ни в аэродинамических трубах, ни в экспериментальных водостоках. Поэтому даже проводимые на самом высоком уровне модельные испытания никогда полностью не воспроизводят реальные полномасштабные эффекты перекачивания, сальтации и взвеси. Такая ситуация вкупе с постоянным развитием вычислительной техники, численных методов и соответствующего программного обеспечения делает безальтернативным развитие и будущее внедрение численного моделирования в реальную строительную практику и нормативные документы.

7. Лучшие результаты физического моделирования коэффициента формы  $\mu$  получаются при крупномасштабных испытаниях в климатических аэродинамических трубах. В получаемых с их помощью результатах для простых форм покрытий легко угадываются нормативные распределения. Такие испытания довольно сложны и затратны для их применения для реальных объектов, но они могут стать мощным инструментом развития СП 20.13330.2016 в части внедрения схем снеговых нагрузок для более сложных форм покрытия.

8. Совершенствование нормативной базы, развитие методов как физического, так и численного моделирования, крайне затруднительно без проведения натуральных экспериментов или измерений, а также крупномасштабных испытаний в климатических аэродинамических трубах. Принимая во внимание отсутствие на территории РФ таких труб, а также сложности с организацией натуральных экспериментов, возможно делать натурные замеры с помощью фотосъемок и последующей обработки результатов. Создание с помощью этих данных базы наблюдений за различными типами покрытий, в которых были бы указаны год измерения, местоположение и некоторые метеорологические сведения, существенно поддержало бы развитие методов как физического, так и численного моделирования, позволило бы

развивать нормативные рекомендации и формировать представление о физических формах снегоотложений у конструкторов, проектировщиков и расчетчиков.

9. 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 только лишь ограниченного набора простых схем из СП 20.13330.2016 и экспериментальных методов. Применение современных высокоточных методов численного моделирования в совокупности с остальными методами является необходимым условием для формирования современной и гибкой нормативной базы, на которую могли бы ориентироваться инженеры-расчетчики для решения задач проектирования гораздо более разнообразной сложности, чем сейчас.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ НА ПОКРЫТИЯХ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

### 2.1 Уравнения поведения газа. Моделирование турбулентности

Основу аэродинамической теории составляет система нелинейных дифференциальных уравнений Навье-Стокса. В общем виде они записываются как:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{F} \quad (9)$$

где  $\vec{v}$  – скорость,  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\rho$  – плотность,  $p$  – давление,  $\mathbf{F}$  – действие внешних сил.

В систему уравнений Навье-Стокса также включаются уравнения сохранения массы (в случае многофазового потока правая часть не равна нулю):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (10)$$

и сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \mathbf{\tau} + \mathbf{S}_M, \quad (11)$$

где  $\mathbf{S}_M$  – действие внешних сил (в т.ч. гравитационных), а  $\mathbf{\tau}$  – тензор напряжений, определяемый как:

$$\mathbf{\tau} = \mu \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I} \right) \quad (12)$$

где  $\mu$  – молекулярная вязкость.

Турбулентность заключается во флуктуациях потока в пространстве и времени. Это сложный процесс, преимущественно потому, что он трехмерный, нестационарный и многоуровневый. Более того, он может оказывать значительное влияние на характеристики потока. Турбулентность наблюдается тогда, когда инерциальные силы потока становятся соизмеримы с вязкими, и характеризуется высокими числами Рейнольдса.

Хотя уравнения Навье-Стокса описывают как ламинарные, так и турбулентные течения без какой-либо дополнительной информации, последние при



реалистичных числах Рейнольдса имеют чрезвычайно высокое разрешение как по длине, так и по времени. Ввиду этого обстоятельства для их решения обычно требуется шаг по пространству много меньшей, чем шаг конечнообъемной сетки, что прямым образом сказывается на затратах вычислительной мощности. Метод прямого численного моделирования (DNS) в применении к подобным течениям потребовал бы мощностей на много порядков выше, чем те, что могут быть доступны в ближайшем обозримом будущем.

Учитывая это, эффекты турбулентности приходится некоторым образом предсказывать. За многие годы изучения данного вопроса возникло значительное количество моделей турбулентности, специально разработанных с тем, чтобы принимать в расчет ее влияние без необходимости использования мелких расчетных сеток и прямого моделирования. Большинство из существующих моделей статистические, и основываются на уравнениях Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS), но также существуют методы, объединяющие моделирование одних (мелких) процессов с разрешением других, такие как метод крупных вихрей (LES) и метод отсоединенных вихрей (DES). Все они, в свою очередь, имеют свои разновидности, заключающиеся в различиях между формулировками тех или иных положений. В данной работе рассмотрены для дальнейшего использования в численных методиках три RANS-модели – «разрешающая»  $k$ - $\varepsilon$  модель (*Realizable k- $\varepsilon$* ) из семейства моделей  $k$ - $\varepsilon$ , модель Shear Stress Transport ( $k$ - $\omega$  SST) и обобщенная  $k$ - $\omega$  модель (*Generalized k- $\omega$* ) из семейства моделей  $k$ - $\omega$ .

### 2.1.1 «Разрешающая» $k$ - $\varepsilon$ модель (*Realizable k- $\varepsilon$* )

Данная модель, являющаяся модернизацией стандартной модели  $k$ - $\varepsilon$ , принадлежит к семейству RANS. Принципиальная идея осреднения по Рейнольдсу заключается в том, что переменные раскладываются на среднюю и флуктуирующую составляющие. Операция проводится как над векторными (например, скоростью)

$$\vec{v}_i = \bar{v}_i + v'_i \quad (i = 1,2,3) \quad (13)$$

так и над скалярными величинами (здесь  $\phi$  – давление, энергия и т.д.):

$$\phi_i = \bar{\phi}_i + \phi'_i \quad (i = 1,2,3) \quad (14)$$

Осредненная составляющая вычисляется следующим образом:

$$\bar{\phi}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi_i dt \quad (i = 1,2,3) \quad (15)$$

где  $\Delta t$  – такой шаг по времени, который является достаточно большим по отношению к турбулентным флуктуациям, но малым – к шагу, с которым решаются уравнения. Для сжимаемых потоков подынтегральная функция домножается на плотность (осреднение по Фавру), но в случае постоянной плотности потока это не имеет смысла.

Подставляя осредненные величины в уравнения состояния и записывая последние в координатной форме, можно получить следующие выражения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v'_i v'_j}) \quad (17)$$

Если же осреднение проводить не по времени, а по ансамблю, то можно получить нестационарные уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу (URANS), с помощью которых можно решать задачи в нестационарной постановке. Возникающие в результате напряжения Рейнольдса  $-\rho \overline{v'_i v'_j}$ , описывающие эффект турбулентности, требуется моделировать, чтобы замкнуть последнее уравнение.

Одна из таких моделей – предложенная Ши и др. (Т.-Н. Shih) [143] «разрешающая» модель  $k$ - $\varepsilon$  (*Realizable k- $\varepsilon$* ), отличающаяся от других моделей этого семейства тем, что выражения для рейнольдсовых напряжений удовлетворяют некоторым математическим ограничениям. Другим преимуществом этой модели, которое используется в настоящей работе, является способность хорошо предсказывать поведение жидкости в пограничном слое под сильным действием неблагоприятного градиента давления, при отсоединении и рециркуляции потока.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon v_j) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (20)$$

Здесь  $G_k$  – член, описывающий генерацию турбулентной кинетической энергии, определяемый так же, как в стандартной модели  $k$ - $\varepsilon$ :

$$G_k = -\rho \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} = \mu_t S^2 \quad (21)$$

$G_b$  описывает генерацию турбулентной кинетической энергии ввиду плавучести и в общем виде записывается как:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (22)$$

где  $Pr_t$  – энергетическое турбулентное число Прандтля (принимается равным 0.85), а  $g_i$  – компонента вектора гравитации. Однако для идеальных газов  $G_b$  можно переписать в виде:

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (23)$$

Член  $Y_M$  относится к сжимаемому потоку, и в разработке методики им можно пренебречь.  $C_{1\varepsilon}$  и  $C_{2\varepsilon}$  – константы модели, здесь равные 1.44 и 1.9, соответственно, а  $\sigma_k$  и  $\sigma_\omega$  – турбулентные числа Прандтля для  $k$  и  $\omega$ , также здесь равные 1.0 и 1.2, соответственно.

Как и для других моделях семейства  $k$ - $\varepsilon$ , вихревая вязкость имеет вид:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (24)$$

Однако, в отличие от стандартной и RNG моделей  $k$ - $\varepsilon$ , в данном случае  $C_\mu$  – переменная, а не константа:

$$C_\mu = \frac{1}{4.04 + \sqrt{6} \cos \phi \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (25)$$

где:

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}, \quad (26)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - 3\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (27)$$

$$\Phi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left( \sqrt{6} \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \right) \quad (28)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (29)$$

Здесь  $\overline{\Omega_{ij}}$  – тензор средней скорости вращения, рассматриваемый во вращающейся системе отсчета с угловой скоростью  $\omega_k$ . Таким образом,  $C_\mu$  является функцией средней скорости деформации и вращения, угловой скорости вращения системы и полей турбулентности ( $k$  и  $\varepsilon$ ). При этом для инерционного подслоя в равновесном пограничном слое  $C_\mu$  может принимать стандартное значение 0.09.

### 2.1.2 Модель $k$ - $\omega$ Shear Stress Transport (SST)

Другой рассмотренной для использования в методиках моделью турбулентности является предложенная Ментером [120] модель Shear Stress Transport (SST), совершенствующая стандартную модель  $k$ - $\omega$ , одним из слабых мест которой является чувствительность к величинам  $k$  и  $\omega$  вне слоя сдвига. Чтобы устранить этот недостаток, в свободном потоке применяется модель  $k$ - $\varepsilon$ , в то время как  $k$ - $\omega$  работает только в пристеночном слое. Для реализации этого подхода модели домножаются на комбинирующую их друг с другом сглаживающую функцию. Более того, определение турбулентной вязкости дополняется с учетом переноса турбулентного напряжения сдвига.

В отличие от «разрешающей» модели  $k$ - $\varepsilon$ , моделируемые уравнения переноса жидкости, введенные в модели  $k$ - $\omega$  SST, имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (30)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (31)$$

Здесь  $G_k$  – то же, что в (21);  $G_\omega$  описывает генерацию  $\omega$ , скорости диссипации турбулентной кинетической энергии. Определение этой величины отличается от такового для стандартной модели и выглядит как:

$$G_\omega = \frac{\alpha}{\nu_t} G_k \quad (32)$$

Коэффициент  $\alpha$  выражается следующим образом:

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left( \frac{\alpha_0 + \frac{Re_t}{R_\omega}}{1 + \frac{Re_t}{R_\omega}} \right), \quad \alpha^* = \alpha_\infty^* \left( \frac{\alpha_0^* + \frac{Re_t}{R_k}}{1 + \frac{Re_t}{R_k}} \right), \quad Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (33)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3}$$

Коэффициент  $\beta_i$  выражается через т.н. сглаживающие функции, которые будут определены позже:

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2} \quad (34)$$

Выражение для коэффициента  $\alpha_\infty$  имеет вид:

$$\alpha_\infty = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (35)$$

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_\infty^*}}, \quad \alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (36)$$

При этом, в случае высоких чисел Рейнольдса,  $\alpha = \alpha_\infty = \alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$ .

Эффективная растворимость  $k$  и  $\omega$  записываются так:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (37)$$

Здесь  $\sigma_k$  и  $\sigma_\omega$  – турбулентные числа Прандтля для  $k$  и  $\omega$ , соответственно.

Турбулентная вязкость  $\mu_t$  определяется выражением:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega} \right]} \quad (38)$$

Здесь  $S$  – величина деформаций, и

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1 - F_1)/\sigma_{k,2}}, \quad \sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1 - F_1)/\sigma_{\omega,2}} \quad (39)$$

Коэффициент  $\alpha^*$  уже определен, а  $F_1$  и  $F_2$  – сглаживающие функции, определяемые как

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (40)$$

$$\Phi_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega}^+ y^2} \right] \quad (41)$$

$$D_{\omega}^+ = \max \left( 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \quad (42)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (43)$$

$$\Phi_2 = \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right) \quad (44)$$

Здесь  $y$  – расстояние до следующей поверхности,  $D_{\omega}^+$  – положительная часть кросс-диффузионного члена  $D_{\omega}$ :

$$D_{\omega} = 2(1 - F_1)\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (45)$$

Члены  $Y_k$  и  $Y_{\omega}$  описывают диссипацию  $k$  и  $\omega$ , соответственно:

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega, \quad Y_{\omega} = \rho \beta \omega^2 \quad (46)$$

В стандартной формулировке модели  $k$ - $\omega$   $Y_k$  домножено на  $f_{\beta^*}$ , а  $Y_{\omega}$  – на  $f_{\beta}$ . В модели SST  $f_{\beta^*} = f_{\beta} = 1$ .

Значения остальных констант модели SST приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения констант модели SST

Константа	Значение	Константа	Значение
$R_{\omega}$	2.95	$\sigma_{\omega,1}$	2.0
$R_k$	6	$\sigma_{\omega,2}$	1.168
$\beta_{i,1}$	0.075	$\alpha_1$	0.31
$\beta_{i,2}$	0.0828	$\sigma_{k,1}$	1.176
$\beta_{\infty}^*$	0.09	$\sigma_{k,2}$	1.0
$\kappa$	0.41		

### 2.1.3 Обобщенная $k$ - $\omega$ модель (*Generalized $k$ - $\omega$* )

В рамках концепции RANS невозможно охватить все виды потоков с достаточной точностью с помощью одной модели. Поэтому промышленные программные комплексы вычислительной аэрогидродинамики предлагают множество моделей турбулентности, позволяя пользователям выбирать наилучшую из них для своих задач. Однако такая стратегия не является оптимальной, поскольку не все модели одинаково качественны (с точки зрения надежности, совместимости с другими моделями, обработки пристеночного слоя), и переход от одной модели к другой имеет дополнительные последствия, помимо желаемого изменения решения. В случае данного исследования и модель  $k$ - $\varepsilon$ , и  $k$ - $\omega$  демонстрировали разное поведение потока вблизи рассматриваемых объектов и на поверхности покрытия. В связи с этим альтернативный подход заключается в использовании единой модели, обладающей достаточной гибкостью для охвата широкого спектра приложений.

Именно такой цели отвечает обобщенная  $k$ - $\omega$  модель (*Generalized  $k$ - $\omega$* ) [121]. Она предоставляет свободные параметры, которые можно регулировать для конкретных задач, не оказывая при этом отрицательного влияния на базовую калибровку модели. В этом ее главное отличие от классических моделей, где коэффициенты хотя и известны (например,  $C_{1\varepsilon}$  и  $C_{2\varepsilon}$  из п. 2.1.1), но их практически невозможно изменить, поскольку они неразрывно связаны с уравнениями, в которых участвуют, и любое самое малое их изменение, как правило, приводит к потере калибровки на самых простых задачах, таких как течение вдоль плоской пластины.

В отличие от «разрешающей» модели  $k$ - $\varepsilon$  и модели  $k$ - $\omega$  SST, моделируемые уравнения переноса жидкости здесь имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k v_j) = P_k - C_\mu \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega v_j) = \\ = C_{\omega_1} F_1 \frac{\omega}{k} P_k - C_{\omega_2} F_2 \rho \omega^2 + \rho F_3 C_D + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \end{aligned} \quad (48)$$

Здесь турбулентная вязкость  $\mu_t$  определяется выражением:

$$\mu_t = \rho \nu_t = \rho \frac{k}{\max[\omega, S/C_{Realize}]} \quad (49)$$

Производство турбулентной энергии  $P_k$  описывается выражением:

$$P_k = -\tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (50)$$

Член перекрестной диффузии  $CD$  имеет вид:

$$CD = \frac{2}{\omega \sigma_\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (51)$$

и, наконец,

$$\tau_{ij} = \tau_{ij}^{EV} - C_{CORNER} \frac{1.2 \mu_t (S_{ik} \Omega_{kj} - \Omega_{ik} S_{kj})}{\max[0.3 \omega, \sqrt{S^2 + \Omega^2}]} \quad (52)$$

$$\tau_{ij}^{EV} = -\rho \overline{v_i v_j'} = \mu_t 2 S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (53)$$

В модели GEKO так же доступны четыре коэффициента, значения которых можно изменять вручную (в определенных допустимых пределах) без потери базовой калибровки модели:

- $C_{SEP}$  – основной параметр, регулирующий поведение жидкости в пограничном слое: его увеличение ведет к уменьшению вихревой вязкости и скорости распространения свободного потока, но повышению чувствительности к неблагоприятному градиенту давления в пограничном слое;
- $C_{NW}$  – параметр, который также регулирует поведение жидкости внутри пограничного слоя: его увеличение ведет к повышению напряжения сдвига на стенке и скорости передачи тепла в неравновесных потоках;
- $C_{MIX}$  – параметр, увеличение которого ведет к повышению скорости распространения свободного потока в противовес  $C_{SEP}$ . В связи с этим, для каждого  $C_{SEP}$  существует оптимальное значение  $C_{MIX}$ , равное  $C_{MixCor} = 0.35 \text{sign}(C_{SEP} - 1) \sqrt{|C_{SEP} - 1|}$  (ему  $C_{MIX}$  также равен по умолчанию);
- $C_{JET}$  – параметр, влияющий преимущественно на реактивные течения и позволяющий регулировать скорость распространения струй;



- $C_{CORNER}$  – нелинейный член напряжения-деформации для учета вторичных потоков вблизи углов;
- $C_{CURV}$  отвечает за подключение отдельной модели коррекции кривизны, которая может быть использована в комбинации с GEKO.

Четкое разделение зон влияния коэффициентов достигается использованием сглаживающих функций подобных тем, что существуют в модели  $k-\omega$  SST. Они имеют следующий вид:

$$L_T = \frac{\sqrt{\max(k, CFb_{Lam}\omega)}}{C_\mu\omega}$$

$$x_{blend} = CFb_{Turb} \frac{L_T}{y} \quad (54)$$

$$F_{GEKO} = \tanh(x_{blend}^4)$$

Рекомендуемые значения коэффициентов модели GEKO приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Рекомендуемые значения коэффициентов (констант) модели SST

MIN		Параметр		MAX		По умолчанию
0.7	≤	$C_{SEP}$	≤	2.5	≤	1.75
-2.0		$C_{NW}$		2.0		0.50
...0.5		$C_{MIX}$		1.0...		$C_{MixCor}$
0.0		$C_{JET}$		1.0		0.90
0.0		$C_{CORNER}$		1.5		1.00
0.0		$C_{CURV}$		1.5		1.00

Выделенные серым значения для  $C_{MIX}$  являются рекомендуемыми, поскольку в некоторых случаях этот коэффициент может быть больше или меньше этих значений.

## 2.2 Численное моделирование сальтирующего слоя снегопереноса

Существует три наиболее распространенных метода моделирования сальтирующего слоя снегопереноса: модель массопереноса Иверсена и др., модель массопереноса Помероя и Грэя, и модель уноса-отложения Нэим и др.

В работах Иверсена и др. [102-105] предложена, а в работе Уэматсу и др. [160] впервые реализована одна из первых численных моделей для трехмерного расчета снегонакопления и снегопереноса, причем учтены как сальтирующий, так и взвешенный слой. Согласно предложенной авторами методике, расчет высоты снегового покрова приводятся в три этапа. На первом этапе происходит расчет поля ветрового потока с применением *RANS*-подхода к моделированию турбулентности. На втором этапе с помощью результатов этого расчета вычисляется плотность потока массопереноса снега. Наконец, на третьем этапе рассчитывается скорость переноса путем подсчета частиц, не перенесенных в сальтирующем слое. Перекачивание снега в данной методике не учитывается.

Масса снега, перенесенного в сальтирующем слое, рассчитывается по формуле, полученной Помероем и Грэм [134]:

$$q = C \frac{\rho_a w_f}{g u_{*t}} u_*^2 (u_{*t} - u_*) \quad (55)$$

где:

$w_f$  [м/с] – средняя скорость оседания снега;

а все остальные величины соответствуют аналогичным в формуле (1).

Взвешенный слой моделируется путем решения уравнения диффузии:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla(\Phi u_s) = \left( K_s \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \left( K_s \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_s \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) - \frac{\partial (w_f \Phi)}{\partial z} \quad (56)$$

где:

$\Phi$  [кг/м<sup>3</sup>] – плотность снегопереноса;

$u_s$  [м/с] – скорость переноса частиц;

$K_s$  – коэффициент вихревой диффузии плотности снегопереноса.

Скорость снегоотложения вычисляется как:

$$d = |w_f| \Phi_h \quad (57)$$

где  $\Phi_h$  – плотность снегопереноса в сальтирующем слое толщиной  $h$ .

Выражение для скорости уноса записывается как:

$$e = \frac{q|w_f|}{u_h h} \quad (58)$$

где  $u_h$  [м/с] – скорость переноса частиц в слое сальтации.

Скорость снегопереноса, которая определяется как масса снега, накапливающегося на площадке единичной площади в единицу времени, имеет вид:

$$s = -(d + e) \quad (59)$$

Разработанная Иверсенем и др. модель была использована Уэматсу и др. при решении четырех задач по расчету снегонакопления: у снегозадержателя, ветроулавливателя, вокруг холма и, наконец, вокруг куба (рисунок 16). Результаты, полученные авторами, показали хорошее согласование с данными физического моделирования и натурного наблюдения. При этом было показано, что с помощью формулы (59) возможно рассчитать лишь скорость снегопереноса, т.е. вычисление высоты снежного покрова возможно только в нестационарной постановке (в физическом времени). Авторы указывают, что вопрос интегрирования скорости снегопереноса должен быть рассмотрен отдельно.

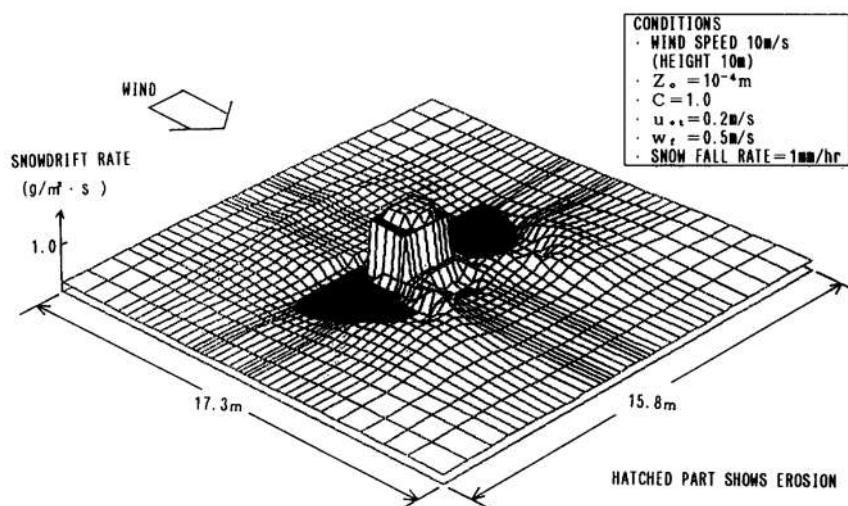


Рисунок 16 – Результат численного моделирования снегонакопления вокруг кубического сооружения (хижины), полученный Уэматсу и др. ([160])

Листона и др. [114] попытались улучшить модель, разработанную Иверсенем и др. и использованную Уэматсу и др. В их работе рассмотрен случай

снегонакопления при достаточно низкой скорости ветра, при которой возможно пренебречь влиянием частиц из сальтирующего слоя на турбулентные вихри ветрового потока, за вычисление которого отвечает первая часть модели. Вторая часть модели позволяет рассчитать перенос частиц в постепенно нарастающий снеговой покров. Для расчета снегонакопления вокруг снегозадержателя в двумерной постановке использовалась модель турбулентности  $k$ - $\varepsilon$  в связанной постановке с разработанной моделью сальтирующего слоя.

Уравнение снегонакопления в турбулентном слое записывается как:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + (v - |w_f|) \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) \quad (60)$$

где:

$v_t$  [м<sup>2</sup>/с] – коэффициент турбулентной вязкости;

$\bar{C}$  [кг/м<sup>3</sup>] – концентрация частиц в единицах плотности;

$\sigma_s$  – турбулентное число Шмидта.

Полагается, что концентрация снега вблизи нижней границы взвешенного слоя равна средней концентрации в сальтирующем слое.

Изменение высоты снежного покрова  $h$  рассчитывается по формуле:

$$\frac{\partial h(x, t)}{\partial t} + \frac{1}{\gamma} + \partial \left( \frac{Q_t(x, t) + Q_s(x, t)}{\partial x} \right) = 0 \quad (61)$$

где:

$\gamma$  [кг/м<sup>3</sup>] – объемная плотность снега;

$Q_t$  [кг/м<sup>2</sup>] – поток массопереноса во взвешенном слое;

$Q_s$  [кг/м<sup>2</sup>] – поток массопереноса в сальтирующем слое.

В этой модели впервые использовалось предположение, что отложение снега происходит тогда, когда скорость трения снеговетрового потока по поверхности становится меньше граничной. Деформация узлов расчетной сетки выполнялась по мере постепенного заполнения конечных объемов. Инерция уноса и отложения в этой модели не учитывалась, поскольку предполагалось, что поток массопереноса в сальтирующем слое может мгновенно реагировать на изменение скорости трения.

Авторы отмечают, что с помощью этой модели невозможно оценить время, которое требуется для формирования снегового покрова заданной толщины [123].

В работах Помероя и Грэй [133, 134] исследовались детали процесса снегопереноса (накопление и перераспределение снеговых масс), таяния снега, влияния талой воды и промерзания слоев снежных масс на сход лавин в горных регионах. Авторы разработали собственные физические модели для описания исследуемых процессов и применили для изучения снегонакопления в канадской провинции Саскачеван. Полученное ими уравнение массопереноса указывает на квадратичную зависимость потока от скорости трения, что согласуется как с другими моделями, так и с данными наблюдений. По аналогии с другими моделями, оно чувствительно к величине когезии снежного покрова.

Поток массопереноса снега со средним весом  $W_p$  и средней скоростью сальтации  $u_p$  имеет вид:

$$Q_{salt} = \frac{u_p W_p}{g} \quad (62)$$

Для вычисления  $W_p$  Померой и Грэй предлагают следующее выражение:

$$W_p = e(\tau - \tau_n - \tau_t) \quad (63)$$

где:

$\tau$  [Па] – напряжение сдвига потока в приземном слое атмосферы;

$\tau_n$  [Па] – напряжение сдвига потока о неразрушаемые поверхности;

$\tau_t$  [Па] – напряжение сдвига потока о разрушаемые поверхности.

Безразмерный коэффициент  $e$ , означающий «эффективность» сальтации, обратно пропорционален кинетическому трению, которое возникает между частицами по мере их столкновения между собой и отрыва от поверхности.

Формула для  $u_p$  записывается как:

$$u_p = cu_{*t} \quad (64)$$

где  $c$  – константа, а  $u_{*t}$  [м/с] – граничная скорость трения, которая отделяет процесс уноса от процесса отложения.

Подставляя (64) и (63) в (62), можно получить общий вид потока массопереноса снега в сальтирующем слое:

$$Q_{salt} = \frac{ce\rho}{g} u_{*t} (u_*^2 - u_{*n}^2 - u_{*t}^2) \quad (65)$$

Значения коэффициентов  $c$  и  $e$  авторы предлагают определять экспериментально. Окончательное выражение  $Q_{salt}$  для имеет вид:

$$Q_{salt} = \frac{0.68\rho}{g} u_{*t} (u_*^2 - u_{*n}^2 - u_{*t}^2) \quad (66)$$

Показано, что, в отличие от полученного Багнолдом результата для песка, в случае со снегом поток пропорционален квадрату скорости трения, а не кубу. Согласно авторам, важным следствием данного выражения является то, что скорость снега в сальтирующей зоне является функцией не собственно скорости трения, а ее пороговой величины. Также авторы подчеркивают, что модели, описывающие сальтирующий слой переноса песка, плохо применимы к снегопереносу даже ввиду самих свойств материалов, для которых они разработаны, поскольку песчинки представляют собой неслипавшиеся частицы, в то время как снежинки – это кристаллы, способные разрушаться и налипать.

Наибольшее применение для описания сальтирующего слоя снегопереноса нашла модель уноса-отложения [123]. В ее основе лежит работа Андерсона и Хаффа [70], в которой была предложена модель сальтирующего слоя переноса песка, состоящая из четырех структурных частей. Первая часть модели отвечает за аэродинамическое увлечение частиц ветром. Вторая часть модели рассчитывает траектории сальтирующих песчинок. Третья часть модели описывает взаимодействие частиц со слоем песка на земле (в том числе вырывание частиц из этого слоя и их возвращение в него), и четвертая – влияние ветра на импульс частиц. Каждая часть модели отвечает за конкретную часть процесса и подкрепляется экспериментальными данными для уточнения значений некоторых констант. В связке части позволяют рассчитывать сальтирующий слой с момента захвата наносов аэродинамическим увлечением до перехода в стационарное состояние. Авторы показывают важную роль длинных, высокоэнергетических траекторий: несмотря на преобладание в зоне сальтации коротких траекторий с малыми энергиями, именно

столкновения наносов с основанием определяют отклик системы на изменение поведения ветрового потока, поскольку отвечают на выбивание новых песчинок из поверхности. Для учета влияния таких скачков, происходящих на временах порядка секунд, авторы предлагают использовать функцию «сплэша». Точный расчет колебаний в скорости ветра позволяет установить отношение между ней и стационарным потоком массы в виде степенной функции от сдвиговой скорости. Данная модель, в отличие от предыдущей, учитывает инерцию, однако функция «сплэша» не подходит для снега в данном авторами виде и требует модификации. Используя эти результаты, Нэим и др. [123] сформулировали модель, которая вот уже четверть века используется исследователями разных стран почти в неизменном виде. Указывая на недостатки в моделях, разработанных Иверсенем и др. и Листоном и др., а также на ограничения, не позволяющие напрямую использовать модель Андерсона и Хаффа, коллектив авторов предложил свой вариант модели уноса-отложения, в котором попытался улучшить результат коллег. Опуская детали вывода уравнений потока, подробно расписанные в оригинальной статье, необходимо обратить внимание на моделирование снегопереноса.

Для потока обмена массой между воздухом и снежным покровом предлагается следующее выражение, аналогичное (59):

$$q_g = q_+ - q_- \quad (67)$$

Поток уноса записывается как:

$$q_- = A\rho_a(u_*^2 - u_{*t}^2) \quad (68)$$

где  $A$  – коэффициент, который зависящий от степени когезии в поверхностном слое,  $\rho_a$  – плотность воздуха.

Поток отложения имеет вид:

$$q_+ = \bar{C}w_f \left( 1 - \frac{u_*^2}{u_{*t}^2} \right) \quad (69)$$

где все обозначения соответствуют аналогичным в предыдущих формулах.

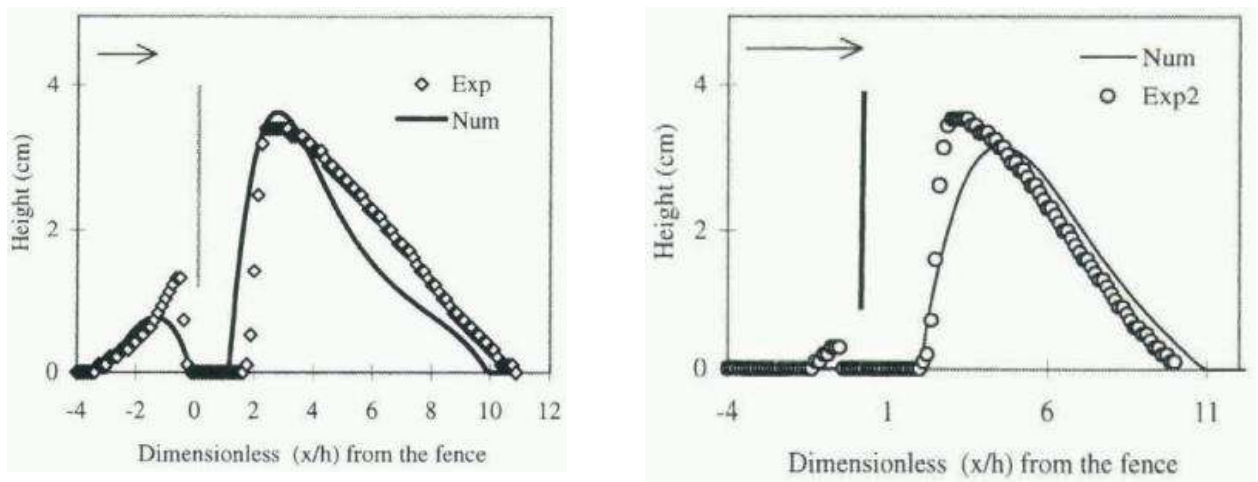
На каждом шаге расчета выражение (2) пересчитывается для потока в каждой ячейке пограничного слоя и затем сравнивается с величиной  $u_t$ . Процесс снегоотложения регулируется следующими условиями:

- отложение:  $u_* < u_t \Rightarrow q_g = q_+$ ;
- без изменений:  $u_* = u_t \Rightarrow q_g = 0$ ;
- унос:  $u_* > u_t \Rightarrow q_g = -q_-$ .

Изменение высоты снежного покрова описывается выражением:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{q_g}{\gamma} \quad (70)$$

Разработанная авторами модель была применена к задаче обтекания снеговетровым потоком сплошного снегозадержателя (рисунок 17). Авторы обращают внимание на то, что несмотря на достаточно хорошее согласование результатов численного и экспериментального моделирования, в будущем выражение для потока уноса должно быть пересмотрено и улучшено. Для этого потребуются или разработка функции «сплэша» для снега при различных условиях, или новые натурные наблюдения. Также авторы пренебрегли перекачиванием крупных частиц вследствие ползучести и учитывали только сальтирующий слой снеготранспорта.



а)  $u_* = 0.23$  м/с,  $u_{*t} = 0.21$  м/с

б)  $u_* = 0.25$  м/с,  $u_{*t} = 0.21$  м/с

Рисунок 17 – Сопоставление численно и экспериментально моделируемой высоты снегоотложений за сплошным снегозадержателем [123]

### 2.3 Методика численного моделирования снегонакопления и снеготранспорта в нестационарной постановке

Из трех описанных выше моделей в качестве основной для разработки методик численного моделирования была выбрана модель уноса-отложения, поскольку



модели Иверсена и Помероя-Грэя являются одновременно предшествующими ей и менее точными в общем случае ([156]). Вдобавок к этому, уравнения модели оказываются удобными для программной реализации в подавляющем большинстве промышленных программных комплексов вычислительной аэрогидродинамики.

Основное уравнение (изменения высоты снегового покрова) имеет вид:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{q_g}{\gamma}, \quad (71)$$

где:

$h$  [м] – высота снегового 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:

$$q_g = q_+ - q_- \quad (72)$$

$$q_+ = C w_f \left( 1 - \frac{u_*^2}{u_t^2} \right) \quad (73)$$

$$q_- = A \rho_a (u_*^2 - u_t^2), \quad (74)$$

где:

$q_+$  [кг/м<sup>2</sup>с] – поток отложения снежной массы;

$q_-$  [кг/м<sup>2</sup>с] – поток уноса снежной массы;

$C$  [кг/м<sup>3</sup>] – концентрация снежной массы около 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 (2), 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** (см. раздел 2.5).

Уравнение (71) решается на каждом временном шаге  $\Delta t$  с использованием пользовательского кода, где  $\partial t = \Delta t$ . Узлы расчетной сетки на рассматриваемой поверхности перемещаются вдоль оси  $z$  на величину  $\partial h = \Delta h$ , получаемую из решения уравнения (71). Расчет продолжается до тех пор, пока не будет достигнут удовлетворительный результат.

Для моделирования турбулентности могут использоваться «разрешающая»  $k$ - $\varepsilon$  модель [143], модель  $k$ - $\omega$  SST [120] и обобщенная  $k$ - $\omega$  модель [121].

## 2.4 Методика численного моделирования снегонакопления и снегопереноса в стационарной постановке

Несмотря на более «явный» характер методики, позволяющий прямо моделировать изменение снегового покрова во времени двухфазным потоком, одним из которых является хоть и сформулированная в эйлеровой постановке, но все же

снежная фаза, необходимость проводить расчет в нестационарной постановке представляется тяжелой вычислительной задачей, поскольку в инженерной практике для исследования снегонакопления необходимо проводить многовариантные расчеты, изменяя направление и скорость ветра. 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 (71), получим:

$$\int_0^H dh = \frac{1}{\gamma} \int_0^T q_g dt \Leftrightarrow H = \frac{T}{\gamma} q_g, \quad (75)$$

где:

$H$  [м] – полученная высота снегового покрова;

$T$  [с] – наблюдаемый период снегонакопления.

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

$$H = \frac{q_+ T_+ - q_- T_-}{\gamma} \quad (76)$$

Варьированием наблюдаемых периодов времени  $T_+$  и  $T_-$  и скоростного режима обдува получают различные картины распределения высот снегового покрова  $H$  на поверхности исследуемого покрытия для выявления опасных с точки зрения механической безопасности конкретного 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. Она включает в себя возможности ранее использовавшихся моделей  $k$ - $\epsilon$  и  $k$ - $\omega$ , что на данный момент делает их использование в стационарной постановке

излишним. В случае большепролетных зданий и сооружений, было обнаружено, что в силу их зачастую вытянутой в каком-либо направлении формы при сравнительно небольшой высоте оптимальным является минимальное значение коэффициента  $C_{SEP} = 0.7$ , либо близкое к нему  $C_{SEP} = 1.0$ . Тем не менее, для каждого конкретного объекта рекомендуется дополнительно калибровать данный коэффициент. Существенного влияния других коэффициентов обнаружено не было.

Другой особенностью методики в стационарной постановке является применение однофазного потока. Выполненные исследования показали, что, поскольку трение снежной фазы напрямую зависит от несущего ее потока воздушной фазы, использование двухфазного потока в большинстве случаев является избыточным, и картин напряжения сдвига только основной фазы достаточно, чтобы получать реалистичные картины распределения снегоотложений.

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) (см. раздел 2.5).

Временные постановки, в которых предлагается применение разработанной методики, обладают своими преимуществами и недостатками. От того, в «явном» (физическом) или «неявном» времени выполняется моделирование, непосредственно зависит как точность рассчитываемых форм снегоотложений, так и вычислительные ресурсы, которые потребуются для вычислений. Однако в зависимости от решаемой задачи использование стационарной постановки в ущерб «явному» моделированию снегонакопления может оказаться оправданным. Более подробно преимущества и недостатки обеих постановок приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Различия между временными постановками при моделировании снегонакопления и снегопереноса

	<b>Преимущества</b>	<b>Недостатки</b>
<b>Нестационарная</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Снегонакопление рассчитывается «явно», в физическом времени</li> <li>2. Учитывается изменение геометрии покрытия по мере роста высоты снежного покрова</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокие требования к качеству сеток для сходимости расчета</li> <li>2. Точность моделирования напрямую зависит от длительности вычислений</li> <li>3. Исключительно высокая ресурсоемкость</li> </ol>
<b>Стационарная</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Достаточная точность для получения общего представления о характере снегонакопления на покрытии</li> <li>2. Высокая скорость вычислений и низкая ресурсоемкость</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Необходимость пренебречь зависимостью некоторых входящих в выражение для потока массопереноса величин от времени</li> <li>2. Отсутствует учет изменения геометрии покрытия по мере роста высоты снежного покрова</li> </ol>

## 2.5 Назначение расчетного коэффициента формы по результатам численного моделирования снегонакопления и снеготранспорта

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]):

$$\mu_{nm} = H_{roof} / H_{ground} \quad (77)$$

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, известной из СП 20.13330.2016, по формуле:

$$H_{ground}^{norm} = \frac{S_g}{\rho g} \quad (78)$$

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 (т.е. снег перемещается в пределах покрытия, без ссыпания). В таком случае выражение для  $\mu_{nm}$  примет вид:

$$\frac{1}{S} \iint_S \mu_{nm} dS = 1, \quad (79)$$

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 исследуемом покрытии имеется равномерно распределенный слой снегового покрова толщиной  $\mu_0 = const$ . Тогда высота снегового покрова на покрытии  $H$ , вычисляемая по формуле (75), может быть выражена в виде:

$$H = \frac{(\mu_{nm} - \mu_0)S_g}{\gamma}, \quad (80)$$

где  $S_g$  [кг/м<sup>2</sup>] – нормативное значение веса снегового покрова для участка строительства, определяемое по рекомендациям нормативных документов. Перепишем формулу (80) с учетом (76) и получим:

$$\mu_{nm} = \mu_0 + \frac{q_+ T_+ - q_- T_-}{S_g}. \quad (81)$$

Выбор между формулами (77) и (81) следует делать в пользу наиболее неблагоприятного распределения значений математически моделируемого коэффициента формы по покрытию. Значение  $\mu_0$  подбирается итерационно из условия (79).

В результате компаративного анализа нормативных документов различных стран, представленного в разделе 1.1, 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 18):

- 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 19);
- 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 18.

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 19). Значение снеговой нагрузки на покрытие возле парапетов  $\mu_p$  следует вычислять с учетом численно моделируемого коэффициента формы  $\mu_{nm}$  в соответствии с рисунком 20.



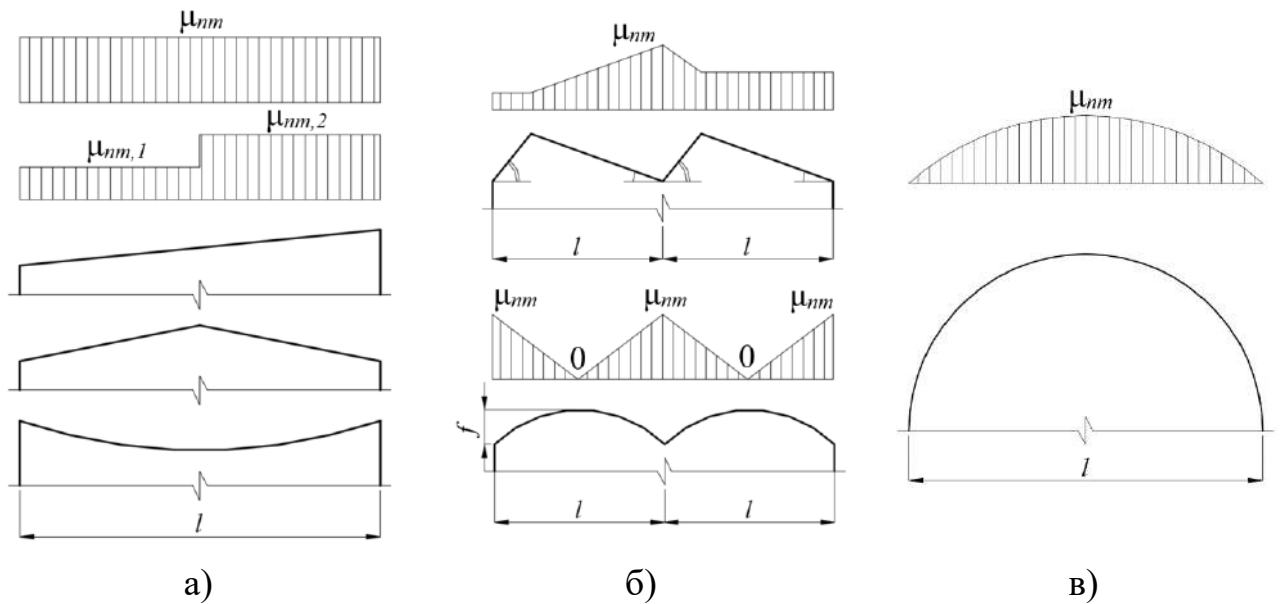


Рисунок 18 – Основные закономерности распределения снеговой нагрузки по типичным формам покрытий (примитивам)

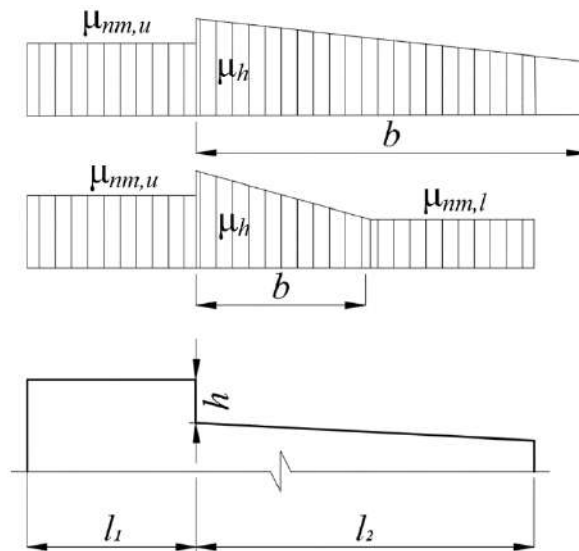


Рисунок 19 – Снеговая нагрузка у перепада высот с учетом результатов моделирования

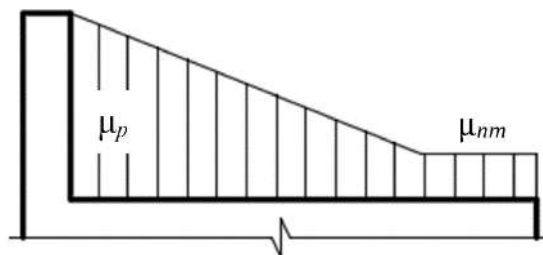


Рисунок 20 – Снеговая нагрузка у парапета с учетом результатов моделирования

Если же для покрытия исследуемого объекта необходимо рассмотреть случай снеговой нагрузки, не отраженный в данных нормах (например, СП 20.13330.2016 [64]), 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 [145]) и нагрузка на трубы и кабель-каналы (п. 7.13.3 ASCE 7-22 [74]).

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.

## **Выводы по главе 2**

1. Описаны основные уравнения поведения газа и жидкости, описано явление турбулентности и сложности, которые накладывает на вычисления необходимость разрешения и, в конечном счете, моделирования турбулентности для замыкания уравнений Навье-Стокса. Также подробно описаны модели турбулентности, выбранные для использования в сочетании с численными методиками моделирования снеговой нагрузки.

2. Перечислены и описаны существующие модели снеготранспорта в сальтирующем слое. Подробно рассмотрены и описаны сами методы, границы их применимости, а также экспериментальные данные, на основании которых проводилась верификация, валидация и калибровка моделей. В качестве основной модели выбрана модель уноса-отложения, согласно которой накопление и уменьшение снеготложений регулируется действием аэродинамических сил и трением потока воздуха по покрытию. Основным регулятором режимов уноса и отложения выступает пороговая скорость трения – пограничная величина, рассчитываемая через напряжение сдвига потока.

3. Сравнительный анализ зарубежных методов моделирования снегонакопления и снегопереноса с отечественными невозможно было провести по причине отсутствия последних. По всей видимости, данное обстоятельство обусловлено тем, что, несмотря на активное развитие этого направления в разных странах мира, российские нормативные документы все еще не разрешают использовать численное моделирование для расчета снеговых нагрузок.

4. На основании модели уноса-отложения была разработана методика математического (численного) моделирования снегонакопления и снегопереноса вблизи и на покрытиях большепролетных зданий и сооружений в нестационарной и стационарной постановках. Методика в нестационарной постановке подразумевает проведение аэродинамических расчетов для получения различных картин снегонакопления на исследуемом покрытии для дальнейшего назначения расчетного коэффициента формы  $\mu$ . Однако, ввиду стохастического характера снегонакопления на покрытиях зданий и сооружений, обусловленного случайностью климатических факторов, для получения статистического результата требуется выполнять неоднократные серийные расчеты снеговой нагрузки с варьированием направлений и скорости входного ветрового потока. Только такой подход позволит обеспечить достоверную картину снегонакопления и выявить наиболее опасные с точки зрения механической безопасности варианты нагрузки. В связи с этим известные своими высокими требованиями к вычислительным мощностям нестационарные расчеты на данный момент представляются нецелесообразными. Поэтому был разработан вариант методики в стационарной постановке, которая подразумевает проведение аэродинамических расчетов на больших интервалах времени  $T$ .

5. В результате применения разработанной методики возможно получать распределения численно моделируемого коэффициента формы, который не равнозначен расчетному коэффициенту формы. Ввиду статистического характера расчетного коэффициента формы, его назначение должно проводиться с учетом как результатов моделирования, так и нормативных рекомендаций. Для этого покрытие, целиком или по частям (с учетом подлежащих несущих конструкций), должно

быть предварительно аппроксимировано примитивами, для которых известны основные закономерности распределения снеговой нагрузки из норм.

## ГЛАВА 3. ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ НА ПОКРЫТИЯХ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

### 3.1 Общие положения. Выбор верификационных задач

Помимо очевидно необходимого наличия достоверного расчетного и экспериментального подтверждения, при выборе верификационных задач учитывалось два основных обстоятельства.

Во-первых, необходимо было продемонстрировать возможность получать с помощью разработанной методики в обеих временных постановках характерные формы снегоотложений. Наиболее наглядным примером для этого является обтекание отдельно стоящего куба (или параллелепипеда): известно [130, 153, 156, 160], что в течение процесса снегонакопления со временем вокруг него образуется три характерные структуры: наветренный сугроб на некотором расстоянии перед кубом, подковообразный след от потока уноса в непосредственной близости от куба, и подветренный сугроб за кубом вытянутой формы в зоне рециркуляции потока. При этом количественные характеристики указанных структур (например, высота сугробов, ширина следа и другие), существенно варьируются между исследованиями и сильно связаны как с входными параметрами, так и с геометрией обтекаемого сооружения, не все из которых удастся зафиксировать в ходе наблюдений и экспериментов. Поэтому при рассмотрении данной задачи интерес состоит в первую очередь в качественной оценке результатов численного моделирования, непосредственном получении указанных структур и их зависимости от входных параметров, геометрии куба и расчетной области.

Во-вторых, при условии успешного решения первой верификационной задачи, необходимо также изучить и количественный характер получаемых результатов и оценить, как он соотносится с какими-либо нормативными рекомендациями (например, СП [64] или Еврокода [145]). Поскольку обтекание куба в этом смысле представляет слабый интерес, было решено исследовать снегонакопление на двускатной крыше, для которого известно неравномерное нормативное

распределение снеговой нагрузки ( $\mu = 0.75$  для наветренного ската и  $\mu = 1.25$  – для подветренного). Помимо количественного характера результатов, оценивался и качественный, а именно форма получаемых снегоотложений на каждом скате крыши.

## 3.2 Снегонакопление вокруг отдельно стоящего куба в нестационарной постановке

### 3.2.1 Описание расчетной модели

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 со следующими характеристиками:

- основная (несущая) фаза – воздух,  $\rho_a = 1.225 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu_a = 1.79 \times 10^{-5} \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ ;
- побочная (несомая) фаза – лед с варьирующейся плотностью,  $\mu_i = 1.72 \times 10^{-5} \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ ;
- насыпная плотность несомой фазы –  $150 \text{ кг/м}^3$ , средний диаметр частиц –  $10 \text{ мкм}$ .
- внешние условия: давление – 1 атм, ускорение свободного падения –  $9.81 \text{ м/с}^2$ .

Профиль скорости потока на входе расчетной области задавался логарифмическим законом:

$$u(z) = \frac{u_*^0}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (82)$$

где:

$z$  [м] – высота над поверхностью земли;

$\kappa = 0.41$  – постоянная Кармана;

$z_0$  [м] – длина шероховатости;

$u_*^0$  [м/с] – начальное значение скорости трения.

Задание профиля скорости и перемещение узлов расчетной сетки выполнялось с помощью специальных пользовательских функций, написанных на языке C. Аэродинамический домен (рисунок 19) формировался из конечнообъемной сетки

(рисунок 18), созданной с помощью ANSYS Mechanical. Предварительные расчеты в стационарной постановке были выполнены с целью определения начальных значений доли снега и скорости трения на источнике домена. На основании полученных результатов они были приняты равными  $1 \cdot 10^{-40}\%$  и 0.3 м/с, соответственно.

### 3.2.2 Параметры расчета

Расчет выполнялся в программном комплексе ANSYS Fluent в нестационарной постановке, в течение 60 мин физического времени с шагом 1 с. Для моделирования турбулентности использовался подход *URANS* – разрешающая *k-ε* модель с применением масштабируемой функции стенки (Scalable Wall Function). Отдельные авторы предлагают вручную рассчитывать величину напряжения сдвига на стенках, однако расчеты в целом показывают, что допустимо использовать значения, вычисляемые самим программным комплексом ([142]). На вычисление одного шага по времени был задан максимум в 20 итераций. После выхода расчета на установившийся режим вычисление одного шага занимало не более 2-3 итераций.

Полный перечень значений параметров приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Значения параметров для нестационарного расчета

Параметр	$u_*^0$ , м/с	$u_t$ , м/с	$z_0$ , м	$Ar_a$	$w_f$ , м/с	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	$t_{расч}$ , с	$\Delta t$ , с
Значение	0.3	0.04	0.1	$1 \cdot 10^{-4}$	0.5	150	3600	1

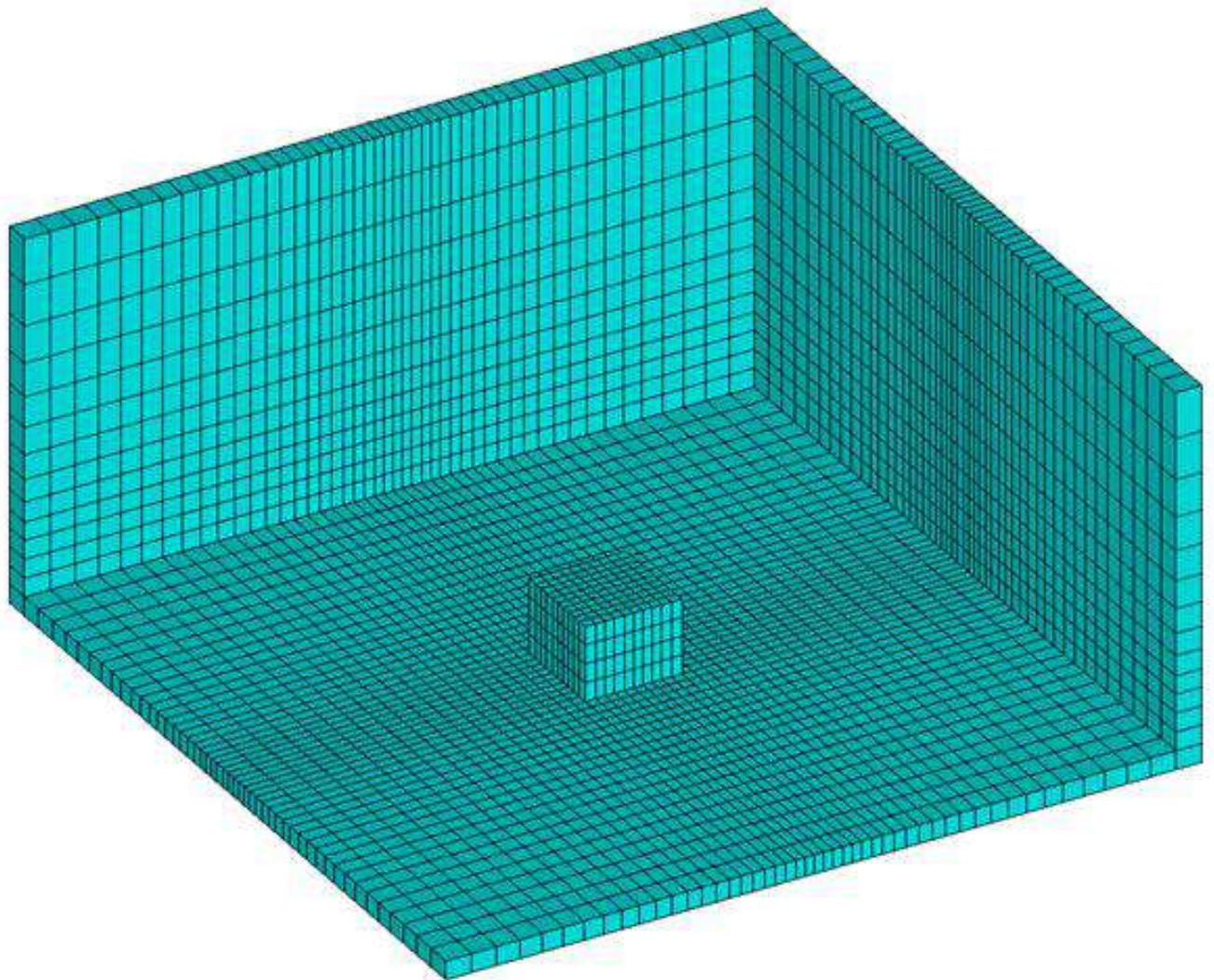


Рисунок 21 – Внешний слой расчетной сетки аэродинамического домена

Количество ячеек конечнообъемной модели – 32000



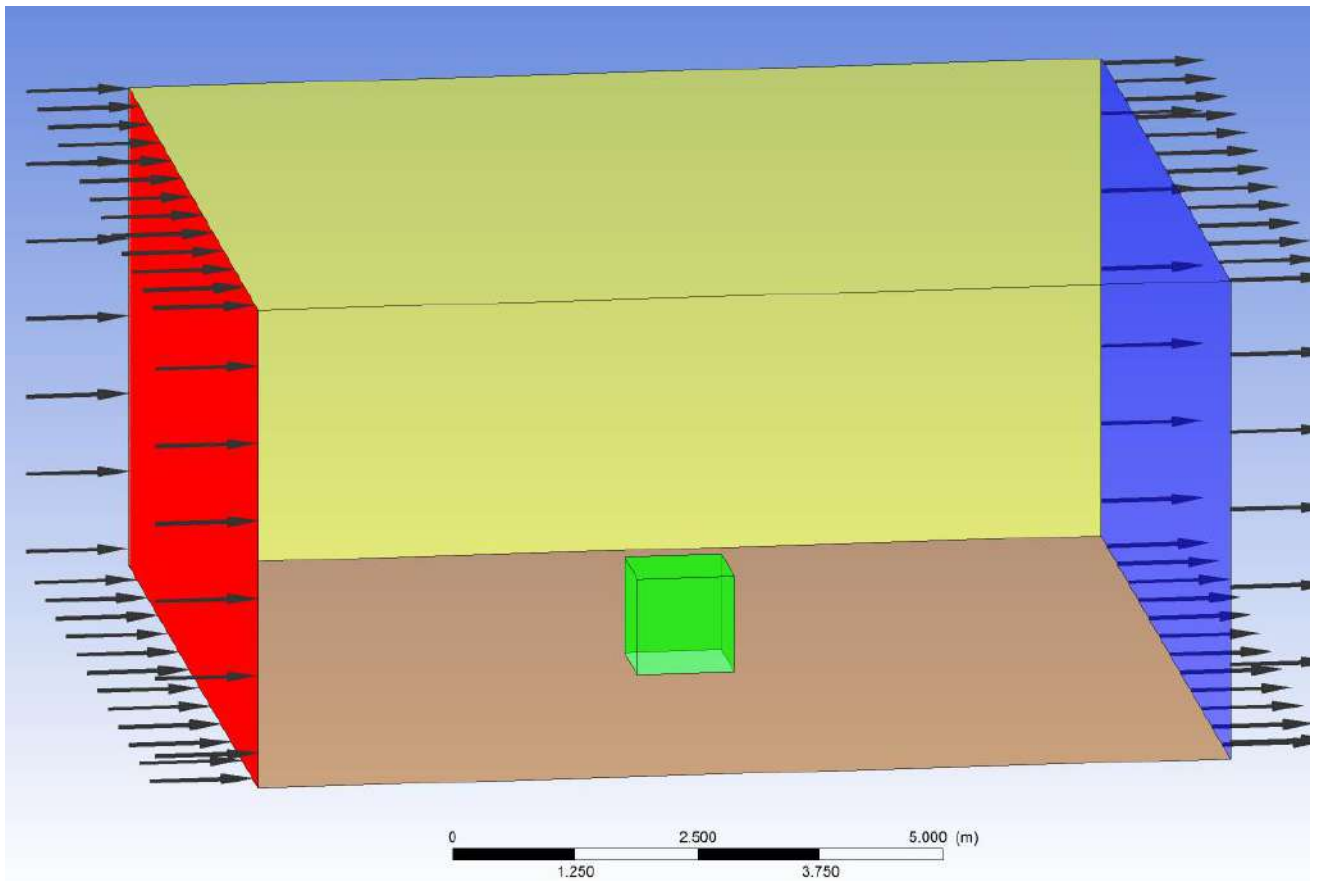


Рисунок 22 – Схема расчетной области

Таблица 6 – Граничные условия в расчетной области

Зона	Цвет (рис.22)	Описание	Граничное условие	Деформация узлов сетки
<b>Inlet</b>	Красный	Вход/источник	Профиль скорости, доля снега $1e-4$	Нет
<b>Outlet</b>	Синий	Выход/сток	Отн. давление 0 Па	Нет
<b>Floor</b>	Бурый	Поверхность снегонакопления	Стенка с прилипанием (без проскальзывания)	Да
<b>Box</b>	Зеленый	Сооружение (куб)		Да
<b>Walls</b>	Желтый	Стенки расчетной области		Нет
На входе: интенсивность турбулентности 5%, отношение вязкости 10.				

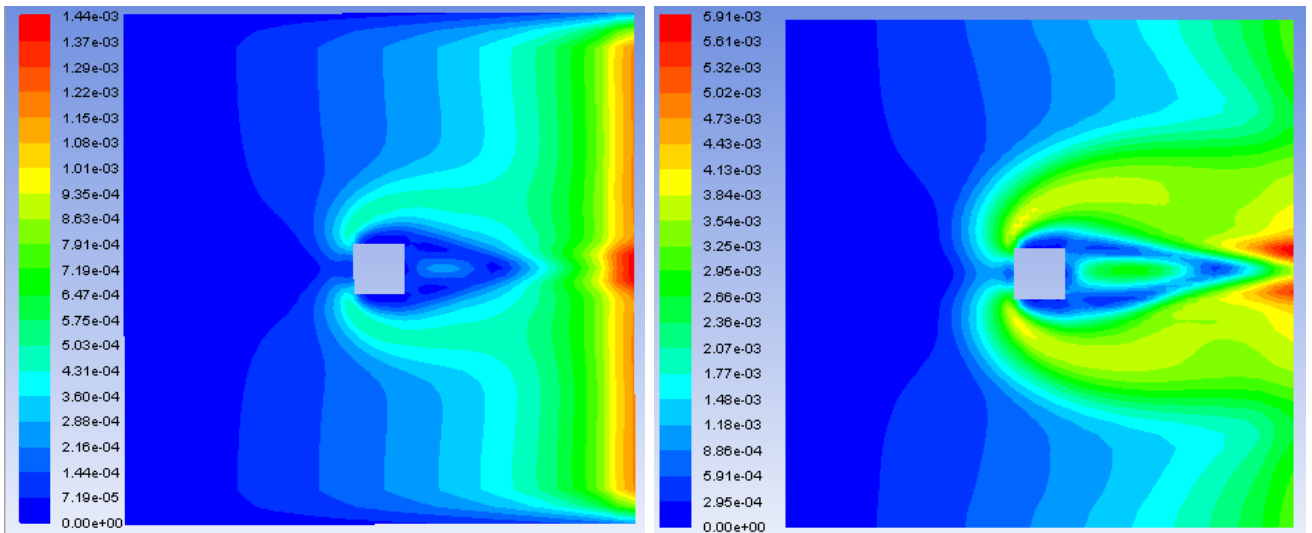


Рисунок 23 – Выбор значения начальной скорости трения: при фиксированном значении объемной доли снежной фазы  $1e-4$  изополя напряжений сдвига (Па) на «земле» расчетной области в целом повторяют подковообразную картину обтекания куба потоком при обоих предельных значениях начальной скорости трения ( $u_{*,1}^0=0.1$  м/с (слева) и  $u_{*,2}^0=0.4$  м/с (справа)), однако для первого значения наблюдается зона увеличения напряжений сдвига на выходе расчетной области

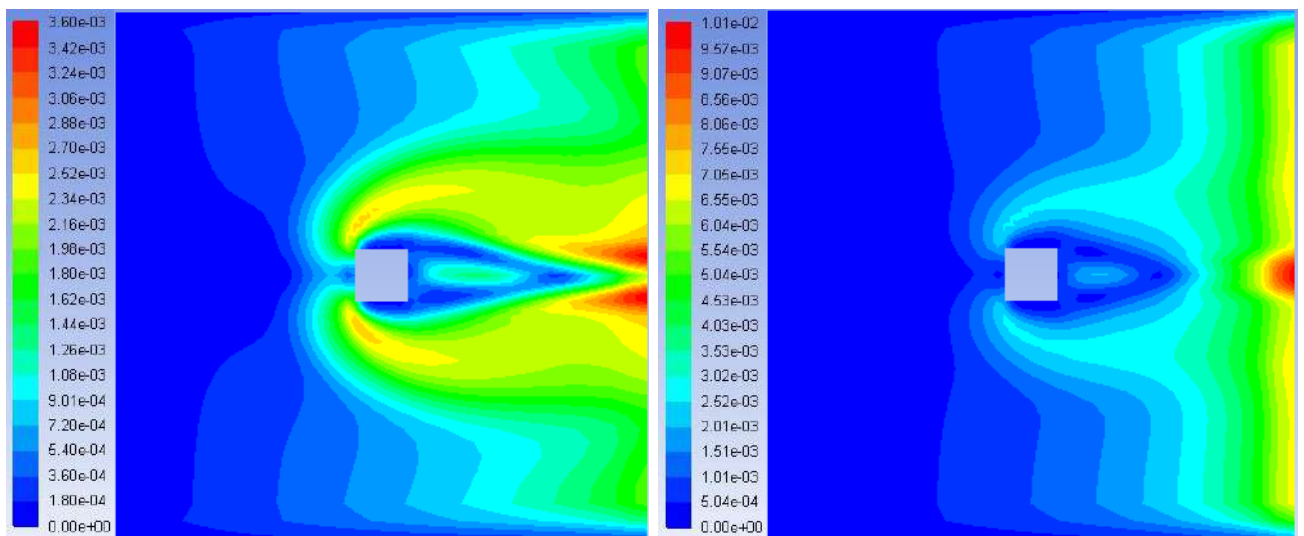


Рисунок 24 – Выбор значения объемной доли снежной фазы: при фиксированном значении начальной скорости трения  $u_*^0=0.3$  м/с изополя напряжений сдвига (Па) на «земле» расчетной области изменяются «обратно пропорционально» увеличению доли снега: для значения  $1e-3$  (справа) картины более гладкие по сравнению со значением  $5e-5$  (слева), хотя и с локализованной зоной увеличения напряжений сдвига за кубом на выходе расчетной области

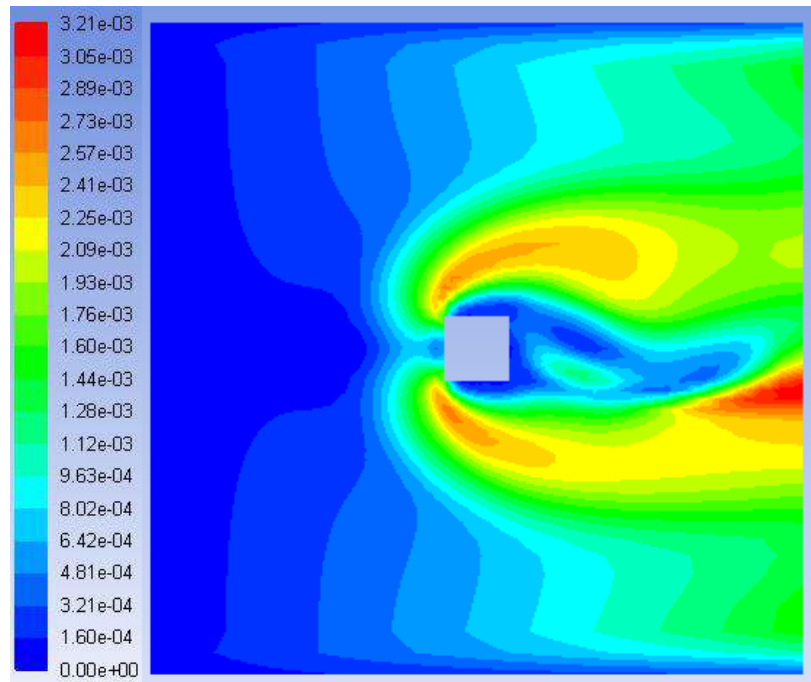


Рисунок 25 – Напряжение сдвига (Па) на «земле» расчетной области при доле снега, равной  $1e-5$ . При данном значении процесс становится нелинейным: так, наблюдаются снегоотложения, которые повторяют форму дорожки Кармана и меняются с течением времени

### 3.2.3 Анализ полученных результатов

Рассчитанное снегонакопление (рисунок 27) в целом согласуется с данными натурных наблюдений (рисунок 26): так, визуализируются два характерных сугроба с наветренной и подветренной сторон, а также подковообразный след от потока уноса. Угловатые артефакты по краям домена возникли из-за ограничения на рост снегового покрова вблизи зон *Symmetry*. Высота снегоотложений вблизи зоны *Inlet* может быть объяснена малыми размерами домена: в силу особенностей вычислительных алгоритмов, между *Inlet* и объектом обычно образуется зона повышенного давления, которое в данном случае могло вызвать завышение напряжения сдвига на поверхности. Дополнительно были проведены расчеты со значениями пороговой скорости трения чуть большей и чуть меньшей, чем в первом случае. Результаты расчетов приведены на рисунке 28 и демонстрируют закономерную «реакцию» высоты снегоотложений на изменение этого параметра.

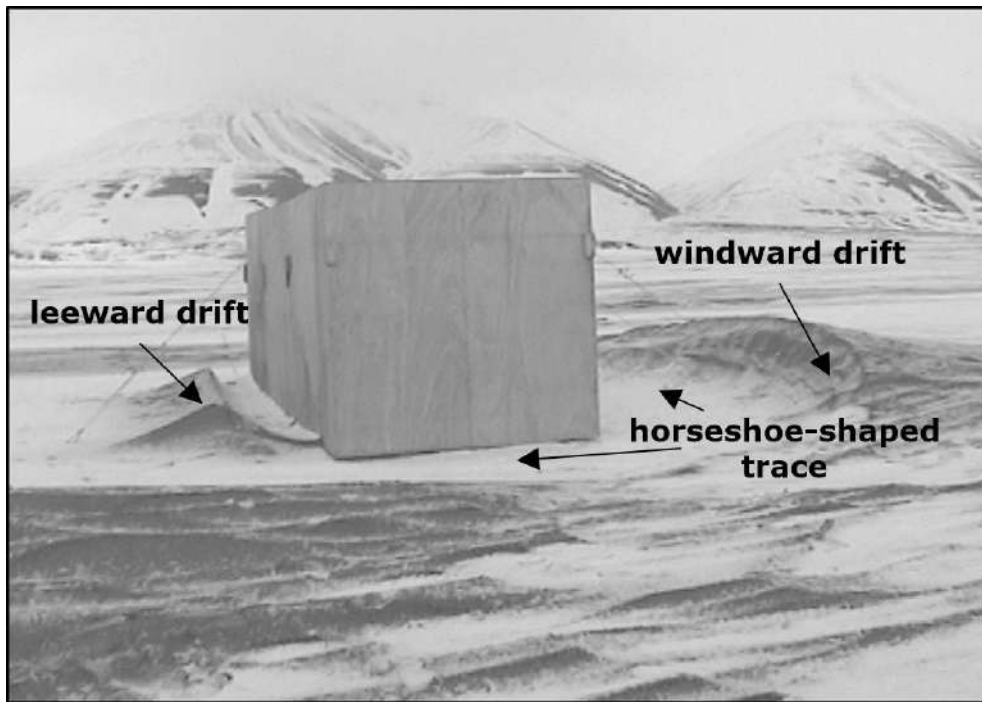


Рисунок 26 – Характерные образования с наветренной и подветренной сторон макета, зафиксированные в натурном эксперименте ([153])

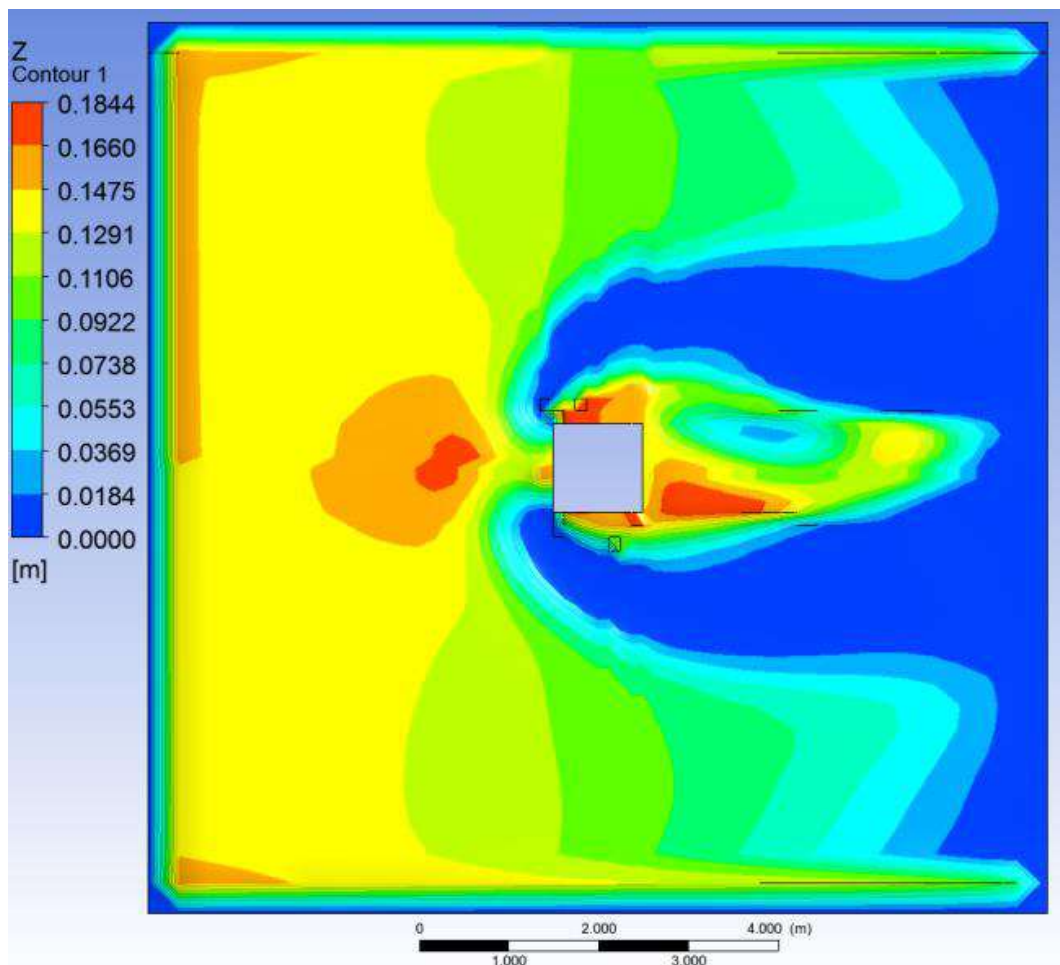


Рисунок 27 – Рассчитанное снегонакопление в момент времени  $t = 3600$  с

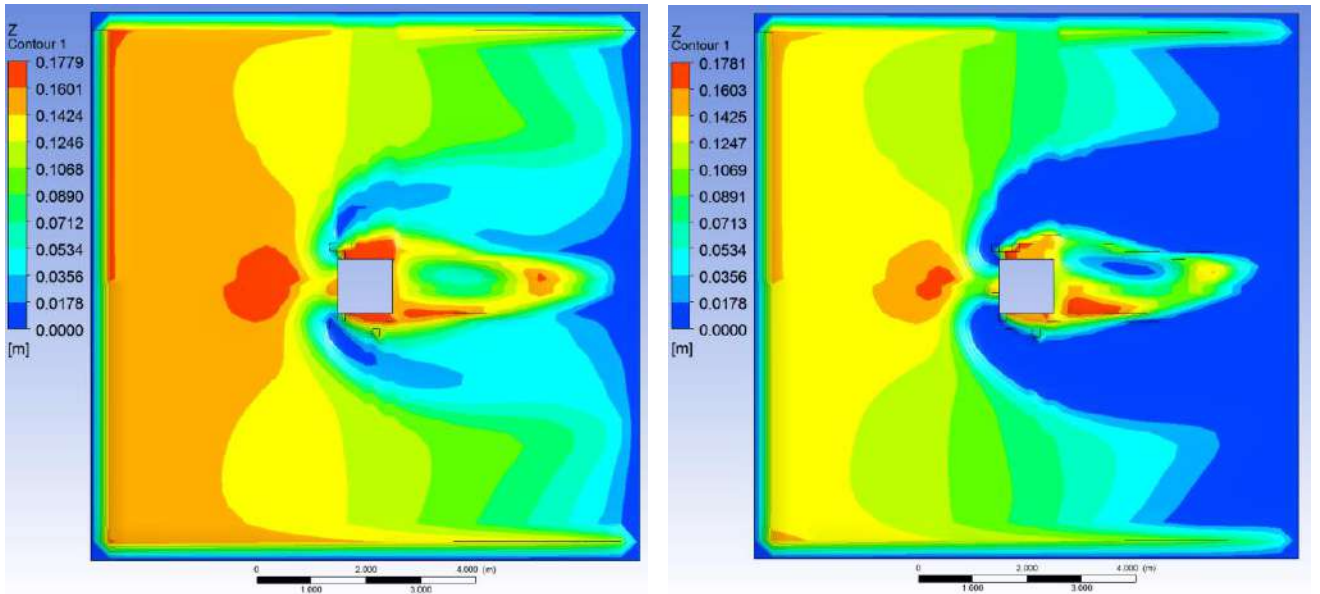


Рисунок 28 – Рассчитанное снегонакопление в момент времени  $t = 3600$  с при  $u_t = 0.045$  м/с (слева) и  $u_t = 0.035$  м/с (справа)

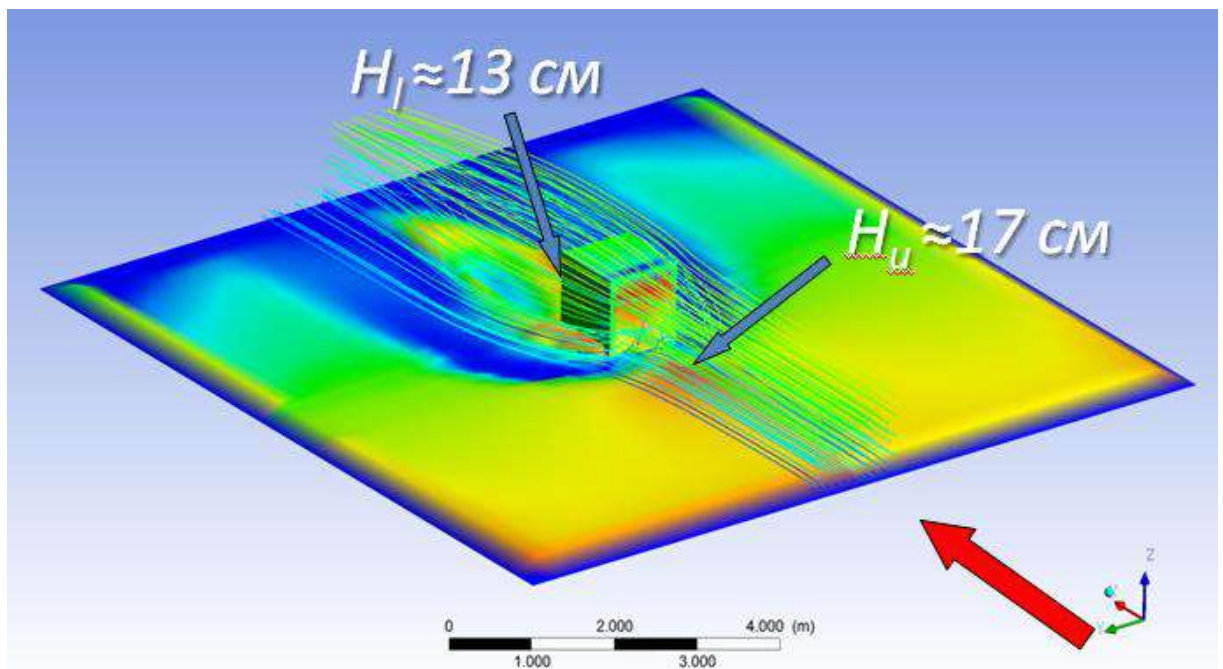


Рисунок 29 – Снегоотложения и линии тока вокруг кубика по окончании расчета ( $t = 3600$  с)

В общем результаты показывают, что применения модели уноса-отложения в данной задаче достаточно для моделирования снеготранспорта. Также они демонстрируют высокую чувствительность получаемых результатов к входным параметрам, ресурсоемкость вычислений и, в целом, стохастичность процесса снегонакопления.



### 3.3 Снегонакопление вокруг отдельно стоящего куба в стационарной постановке

Для верификации методики в стационарной постановке решалась полностью аналогичная задача, но с использованием однофазного потока.

#### 3.3.1 Описание расчетной модели

В прямоугольной расчетной области размером  $10 \times 10 \times 5$  м моделировалось обтекание куба размером  $1 \times 1 \times 1$  м однофазным потоком со следующими характеристиками:

- основная фаза – воздух,  $\rho_a = 1.225 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu_a = 1.79 \times 10^{-5} \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ ;
- внешние условия: давление – 1 атм, ускорение свободного падения –  $9.81 \text{ м/с}^2$ .

Профиль скорости потока на входе расчетной области задавался логарифмическим законом по формуле (82). Аэродинамический домен (рисунок 19) формировался из конечнообъемной сетки (рисунок 18), созданной с помощью ANSYS Mechanical.

#### 3.3.2 Параметры расчета

Расчет выполнялся в программном комплексе ANSYS Fluent в стационарной постановке. Для моделирования турбулентности использовался подход *RANS* – разрешающая *k*- $\epsilon$  модель с масштабируемой функцией стенки (Scalable Wall Function). Максимальное количество итераций для расчета было назначено равным 150, максимальное значение невязок по непрерывности, давлению, турбулентным величинам и компонентам скорости –  $10^{-4}$ . Сходимость достигалась в среднем за 82 итерации.

Полный перечень значений параметров приведен в таблице 7.

Таблица 7 – Значения параметров для стационарного расчета

Параметр	$u_*^0$ , м/с	$u_t$ , м/с	$z_0$ , м	$Ar_a$	$w_f$ , м/с	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	$T$ , с
Значение	0.3	0.04	0.1	$1 \cdot 10^{-4}$	0.5	150	3600

### 3.3.3 Анализ полученных результатов

Рассчитанное снегонакопление (рисунок 30, а) в целом согласуется как с данными натурных наблюдений, так и с результатами численного моделирования в нестационарной постановке. Как и в случае расчета 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 30, б). 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 использования модели уноса-отложения, дополненной гипотезой стационарности, также достаточно для адекватного моделирования снеготложений.

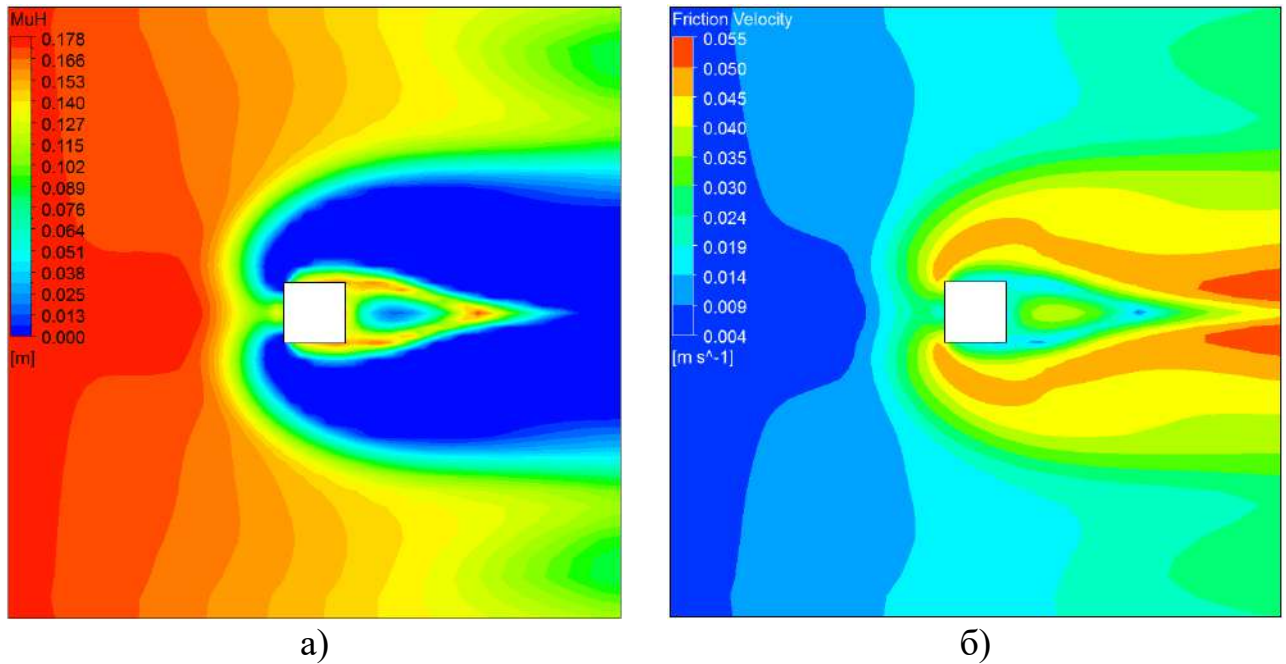


Рисунок 30 – а) Рассчитанные снегоотложения в момент времени  $T = 3600$  с;  
 б) Скорость трения в расчетной области

### 3.4 Снегонакопление на двускатном покрытии в нестационарной постановке

Для решения второй верификационной задачи рассматривалось снегонакопление на двускатном покрытии, при этом в качестве расчетной области была выбрана геометрия динамического контура аэродинамической трубы CSTB (рисунок 31), так как для верификации использовались экспериментальные данные из отчета к Еврокоду ([139, 140]).

#### 3.4.1 Описание расчетной модели

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 теми же характеристиками, что были описаны в п. 3.2.1. Логарифмический профиль скорости на входе расчетной области задавался по формуле (82), для которой значения  $u_{*t}^0$  и  $z_0$  были получены методом наименьших квадратов по данным измеренного профиля в трубе CSTB (рисунок 4.7-3 в [140]) и составили  $0.45$  м/с и  $0.027$  м, соответственно. Для решения этой задачи более сложная геометрия участка аэродинамической трубы была выполнена в модуле ANSYS



SpaceClaim. Как и в предыдущих моделях, аэродинамический домен формировался из конечнообъемной сетки (рисунок 32), в данном случае созданной с помощью модуля ANSYS Fluent Meshing. Хотя количество ячеек сетки и было существенно увеличено по сравнению с предыдущей задачей (в  $\sim 20$  раз) для получения более детализированных результатов, применение технологии Mosaic Mesh (сеток различных типов с висячими узлами) позволило сократить число конечных объемов для оптимизации вычислений. Так, вокруг рассматриваемого объекта была создана сетка из тетраэдров (поскольку динамическое перестроение сетки во Fluent наилучшим образом оптимизировано именно для тетраэдров), а остальная область была заполнена полигексагональными элементами.

### 3.4.2 Параметры расчета

Расчет выполнялся в программном комплексе ANSYS Fluent в нестационарной постановке, в течение 60 мин физического времени с шагом 1 с. Для моделирования турбулентности использовался подход *URANS* – обобщенная  $k-\omega$  модель ( $C_{SEP} = 0.7$ ) с применением стандартной функции стенки (Standard Wall Function). На вычисление одного шага по времени был задан максимум в 20 итераций. После выхода расчета на установившийся режим вычисление одного шага занимало не более 2-3 итераций. В связи с необходимостью сравнить результаты не только качественно, но и количественно, как того требует решение задачи, значения параметров  $u_t$  и  $\gamma$  были увеличены до соответствующих эксперименту.

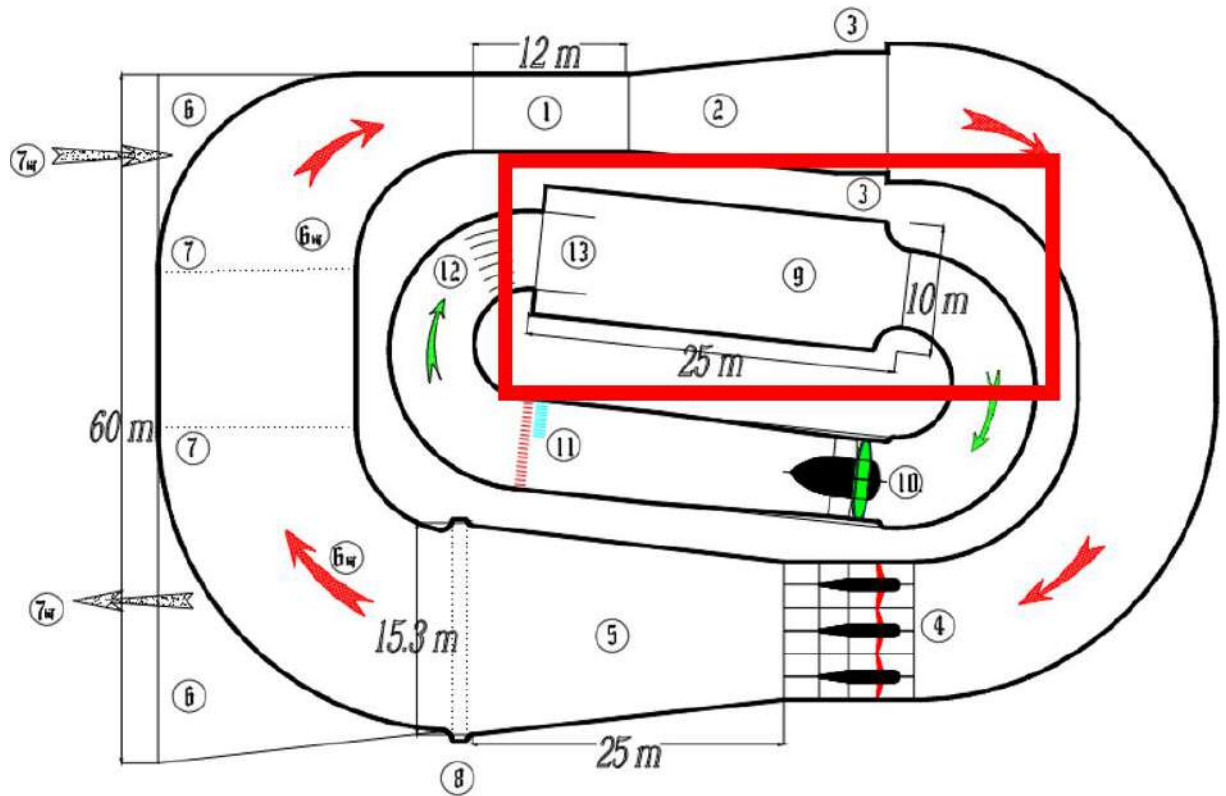


Рисунок 31 – Схема расчетной области – участка аэродинамической трубы CSTB

Полный перечень значений параметров приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Значения параметров для нестационарного расчета

Параметр	$u_*^0$ , м/с	$u_t$ , м/с	$z_0$ , м	$A\rho_a$	$w_f$ , м/с	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	$t_{\text{расч}}$ , с	$\Delta t$ , с
Значение	0.45	0.25	0.027	$1 \cdot 10^{-4}$	0.5	300	3600	1

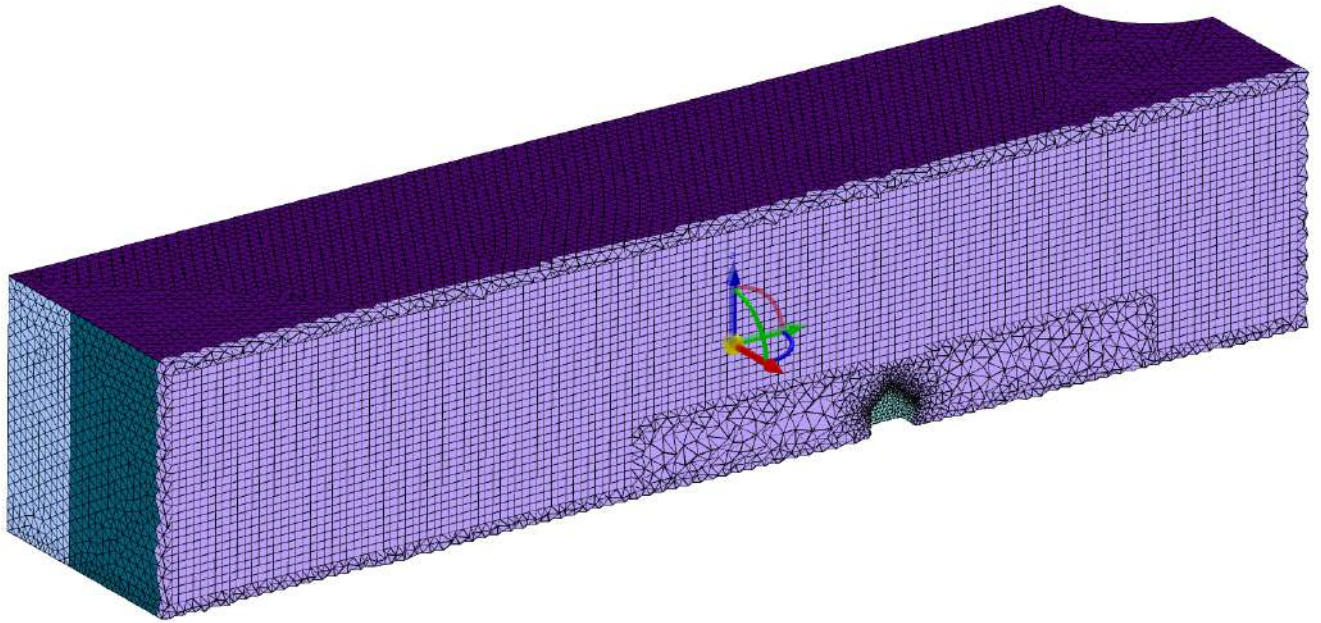


Рисунок 32 – Сечение расчетной сетки аэродинамического домена

Количество ячеек конечнообъемной модели – 604342

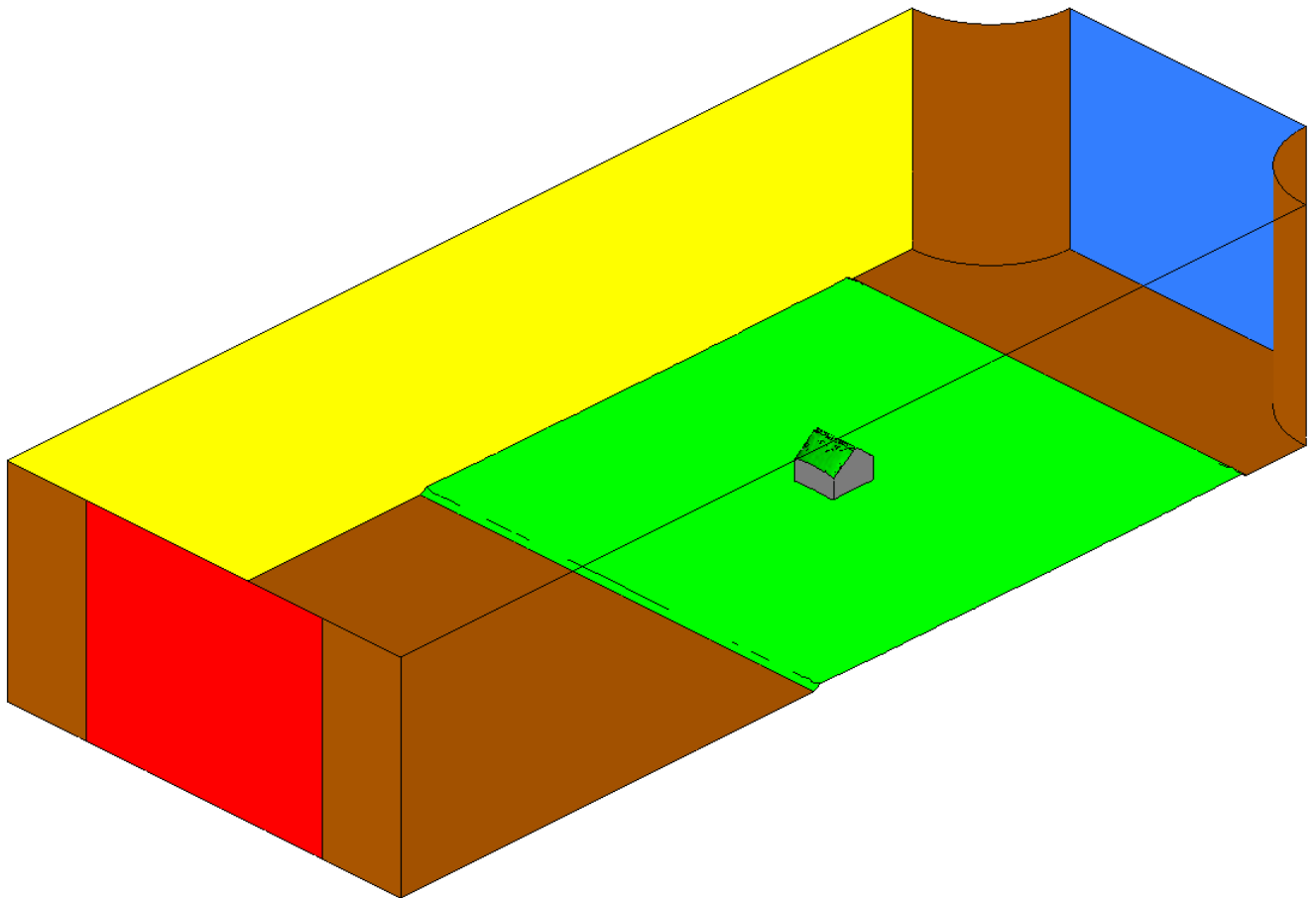


Рисунок 33 – Схема расчетной области

Таблица 9 – Граничные условия для расчетной области

<b>Зона</b>	<b>Цвет (рис. 33)</b>	<b>Описание</b>	<b>Граничное условие</b>	<b>Деформация узлов сетки</b>
<b>Inlet</b>	Красный	Вход/источник	Профиль скорости, доля снега $1e-4$	Нет
<b>Outlet</b>	Синий	Выход/сток	Отн. давление 0 Па	Нет
<b>Bottom, Build, Walls</b>	Бурый, серый	Стенки расчет- ной области	Стенка с прилипанием (без проскальзывания)	Нет
<b>BottomSnow, Roof1, Roof2</b>	Зеленый	Поверхности снегонакопле- ния		Да
<b>Symmetry</b>	Желтый	Стенки расчет- ной области	Стенка без прилипания (с проскальзыванием)	Нет
На входе: интенсивность турбулентности 5%, отношение вязкости 10.				

### 3.4.3 Анализ полученных результатов

Рассчитанное на покрытии здания снегонакопление согласуется как с данными натурных наблюдений (например, рисунок 34), так и с результатами физического моделирования из [140]. Качественно были получены унос снега на наветренной стороне крыши и отложение – на подветренной стороне. Количественно результаты согласуются как в центральном сечении покрытия (рисунок 35), так и интегрально как со строительными нормами, так и с экспериментом (таблица 10). При этом из изополей рассчитанного накопления (рисунки 36, 37, 38) 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.



Рисунок 34 – Характерный снеговой мешок на двускатной крыше (из [140])

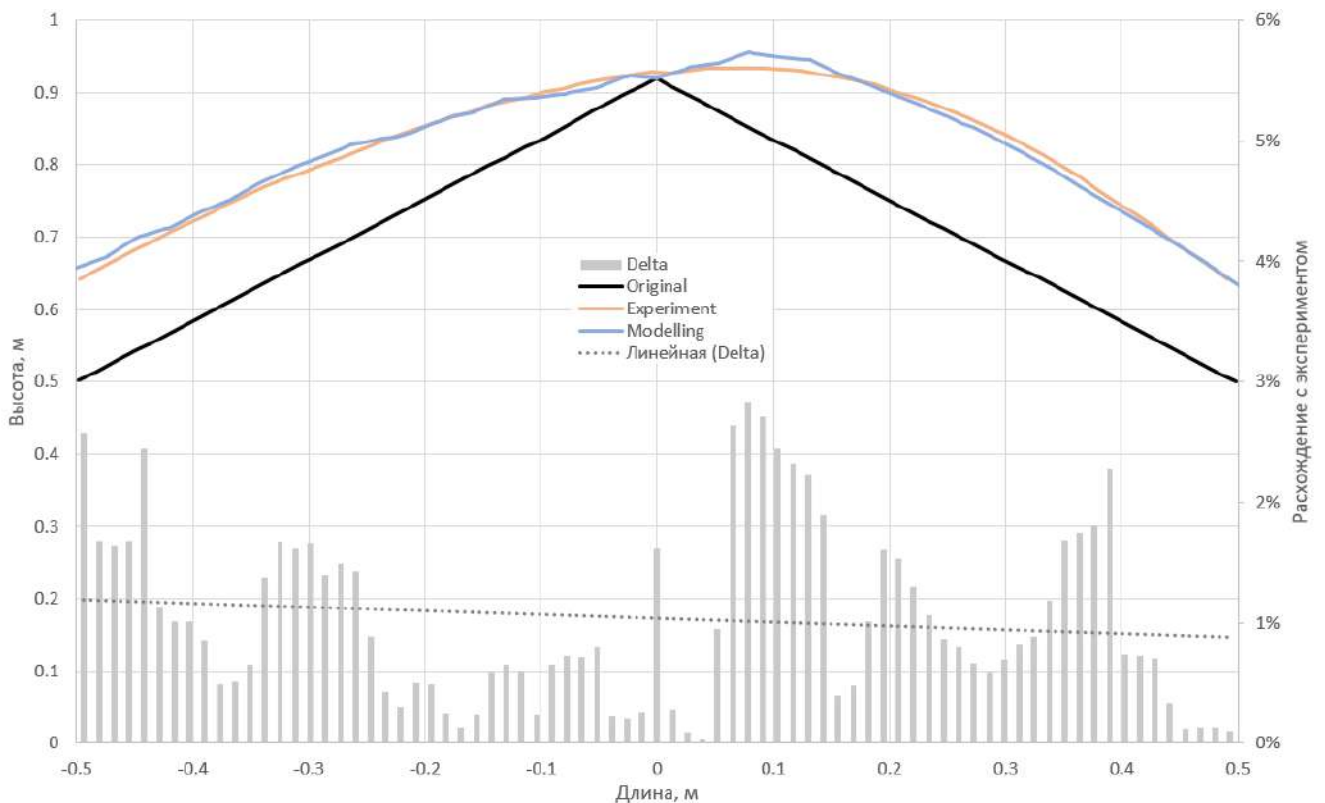


Рисунок 35 – Сопоставление результатов моделирования с экспериментом (рисунок 4.7-12 из [140]) в центральном сечении покрытия (расхождение: минимальное – 0.03%, максимальное – 2.83%, среднее – 1.03%)



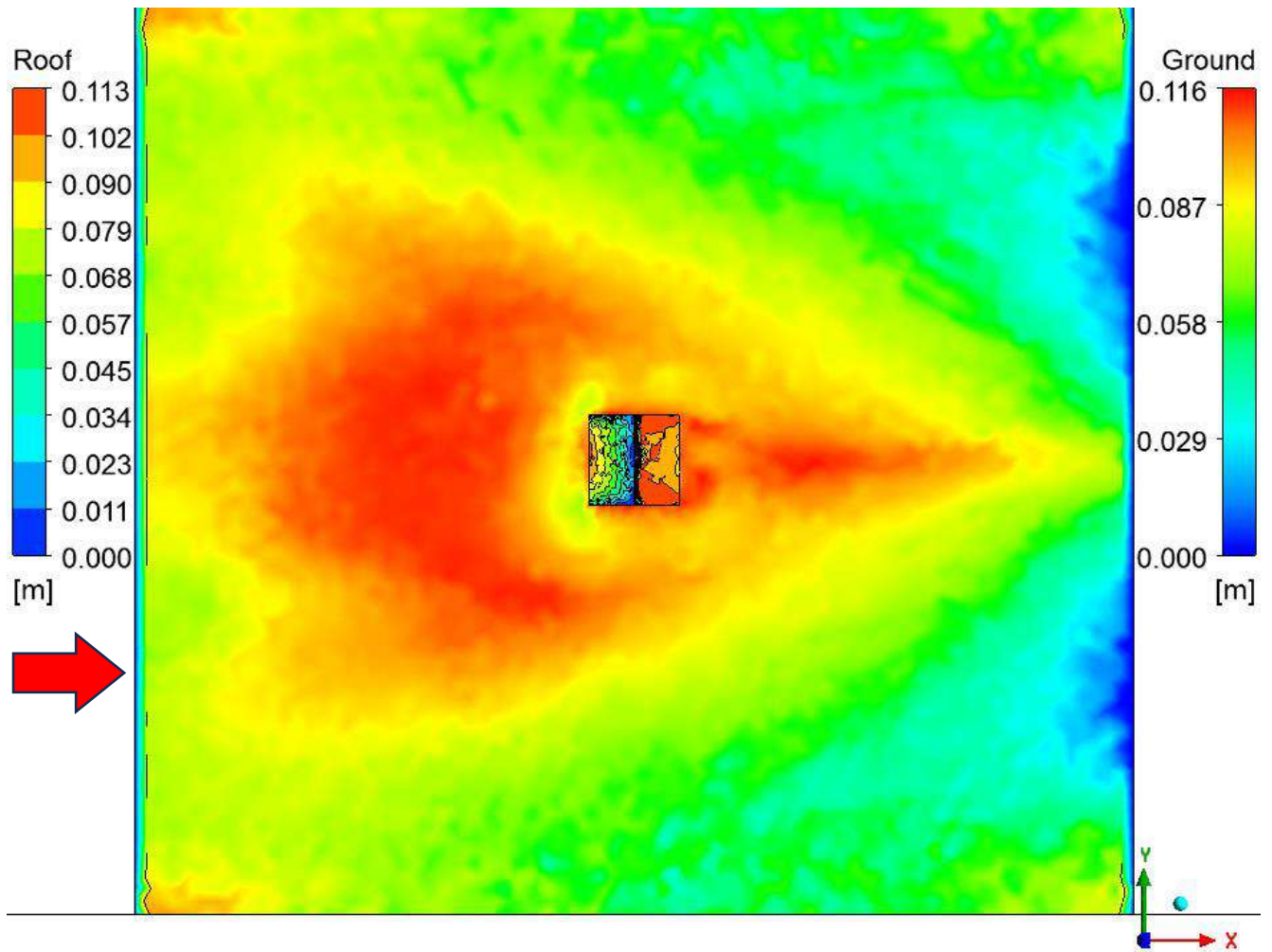


Рисунок 36 – Рассчитанное снегонакопление вокруг и на покрытии модели (стрелкой показано направление набегающего потока)

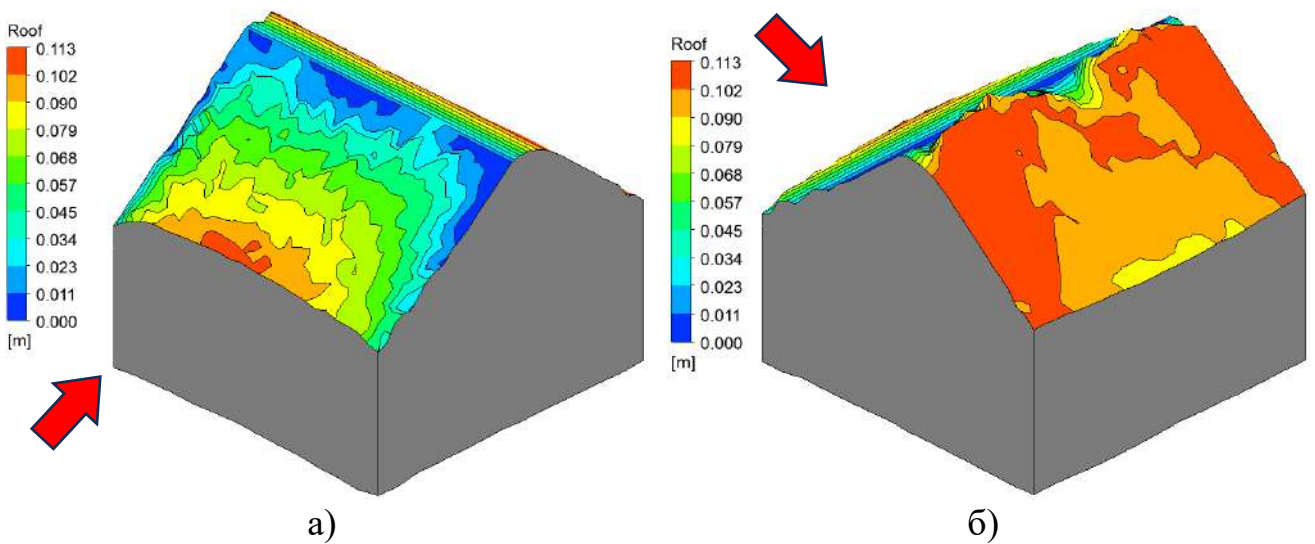


Рисунок 37 – Рассчитанные формы снеговых мешков при обдуве поперек конька модели здания (стрелкой показано направление набегающего потока)

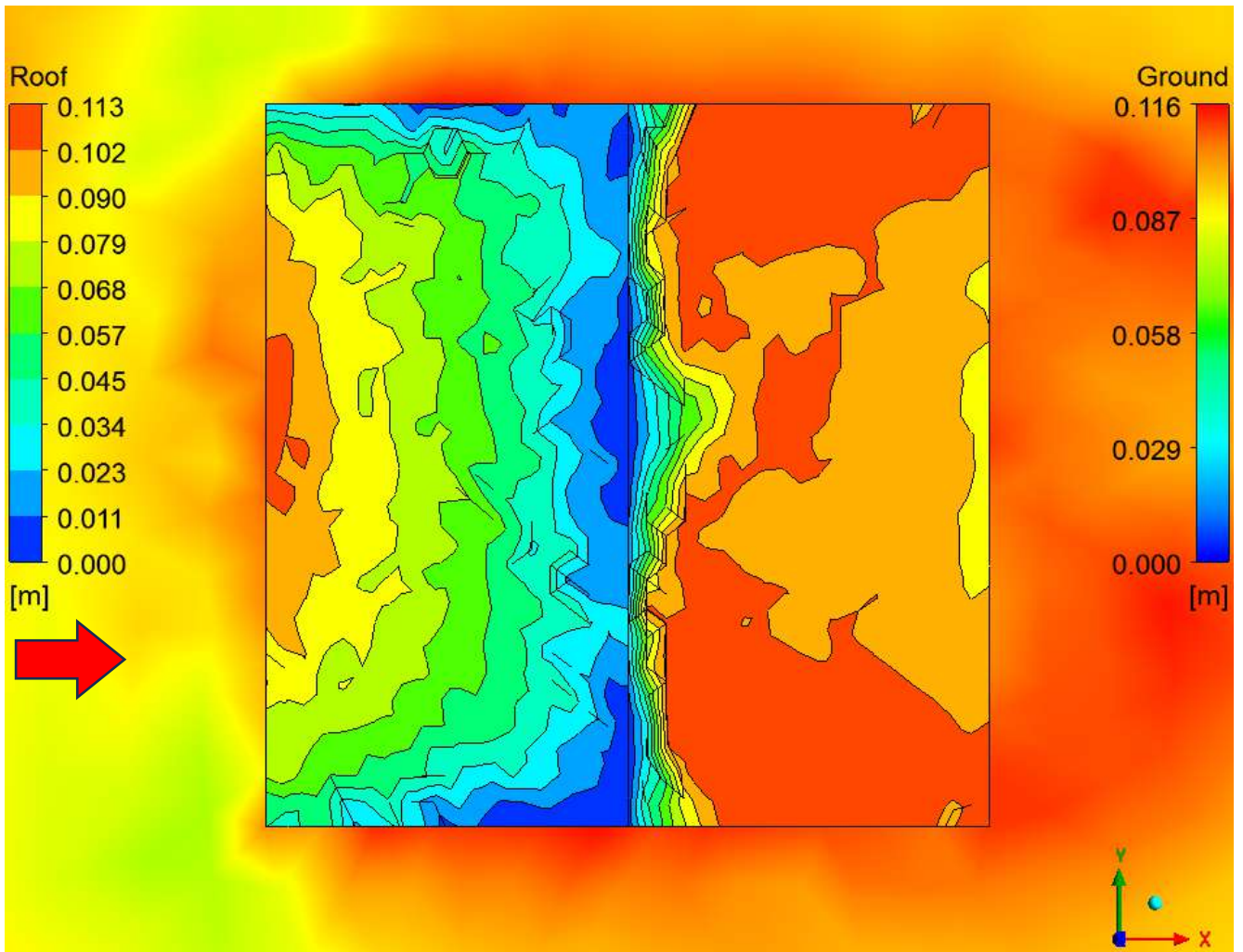


Рисунок 38 – Рассчитанное снегонакопление на покрытии модели

Таблица 10 – Сравнение интегральных значений моделируемого коэффициента формы по результатам физического и численного моделирования с нормами

		$H_{ground}$ , см	$\mu_{ww}$ (с наветренной стороны)	$\mu_{lw}$ (с подветренной стороны)
Моделирование	Физическое	10.5	0.88	1.13
	Численное (формула 77)	8.01	0.74	1.29
Нормативное распределение			0.75	1.25
Расхождение с численным моделированием, %			1.3	3.1

### 3.5 Снегонакопление на двускатном покрытии в стационарной постановке

#### 3.5.1 Описание расчетной модели

В той же расчетной области, что и в п. 3.4, моделировалось обтекание модели здания размером  $1 \times 1 \times 0.92$  м однофазным потоком с логарифмическим профилем скорости на входе. Для сопоставления с результатами моделирования в нестационарной постановке использовалась та же конечнообъемная сетка (рисунок 32) и тот же аэродинамический домен (рисунок 33), что и в п. 3.4.

#### 3.5.2 Параметры расчета

Расчет выполнялся в программном комплексе ANSYS Fluent в стационарной постановке. Для моделирования турбулентности использовался подход *RANS* – обобщенная *k- $\omega$*  модель ( $C_{SEP} = 0.7$ ) с применением стандартной функции стенки (Standard Wall Function). Максимальное количество итераций для расчета было назначено равным 150, максимальное значение невязок по непрерывности, давлению, турбулентным величинам и компонентам скорости –  $10^{-4}$ .

Полный перечень значений параметров приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Значения параметров для стационарного расчета

Параметр	$u_*^0$ , м/с	$u_t$ , м/с	$z_0$ , м	$A\rho_a$	$w_f$ , м/с	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	$T$ , с
Значение	0.45	0.25	0.027	$1 \cdot 10^{-4}$	0.5	300	3600

#### 3.5.3 Анализ полученных результатов

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 39) 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 надветренным сугробом вблизи отдельно стоящего куба, это связано с величиной скорости трений 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.

В заключение следует отметить, что, несмотря на продемонстрированное вычислительное преимущество методики в стационарной постановке над методикой в нестационарной постановке, результаты моделирования в чистом виде не могут быть использованы непосредственно для получения расчетного коэффициента формы. Следует также отметить, что максимальная высота поверхности снега зависит от периодов наблюдения  $T_+$  и  $T_-$  и может быть скорректирована, однако форма снеговых мешков и режим снегопереноса остаются неизменными и полностью зависит от характера напряжения сдвига на крыше.

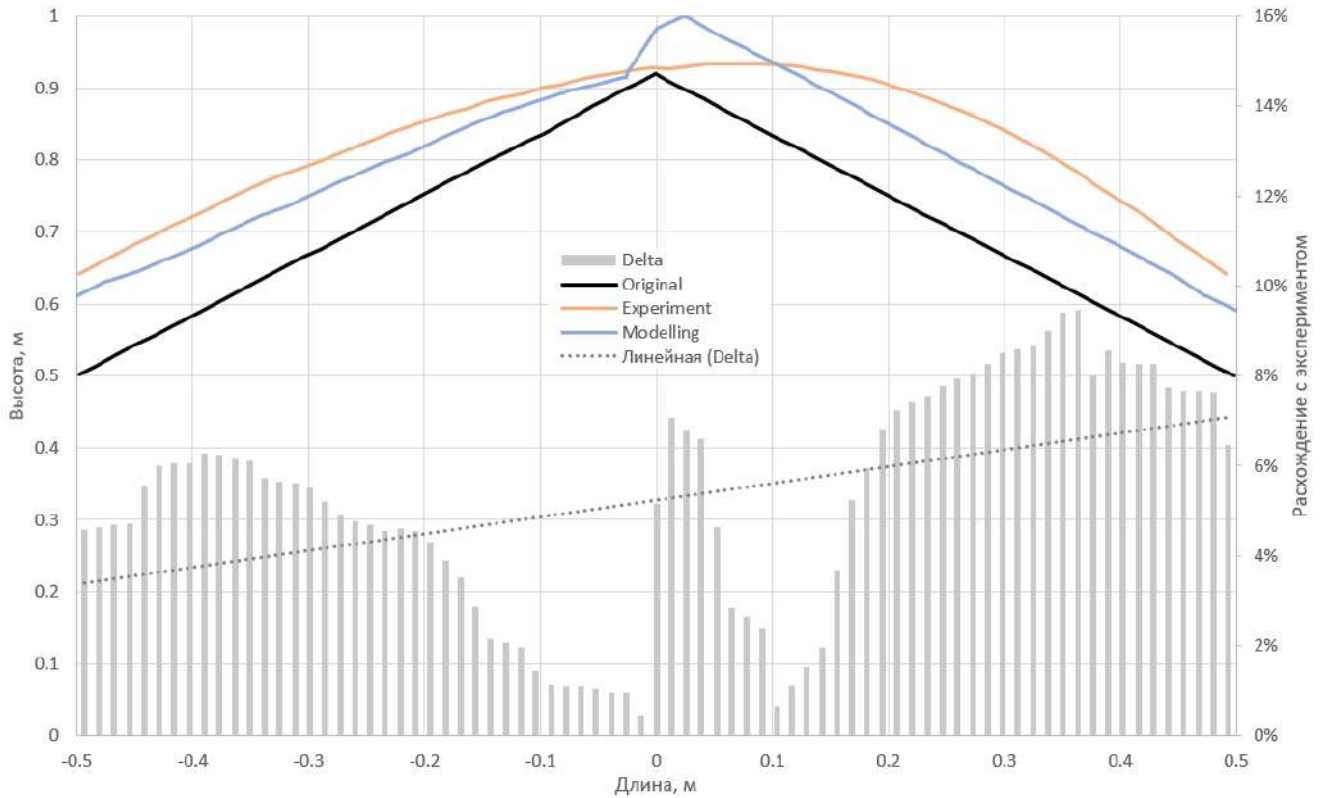


Рисунок 39 – Сопоставление результатов моделирования с экспериментом (рисунок 4.7-12 из [140]) в центральном сечении покрытия (расхождение: минимальное – 0.44%, максимальное – 9.45%, среднее – 5.24%)

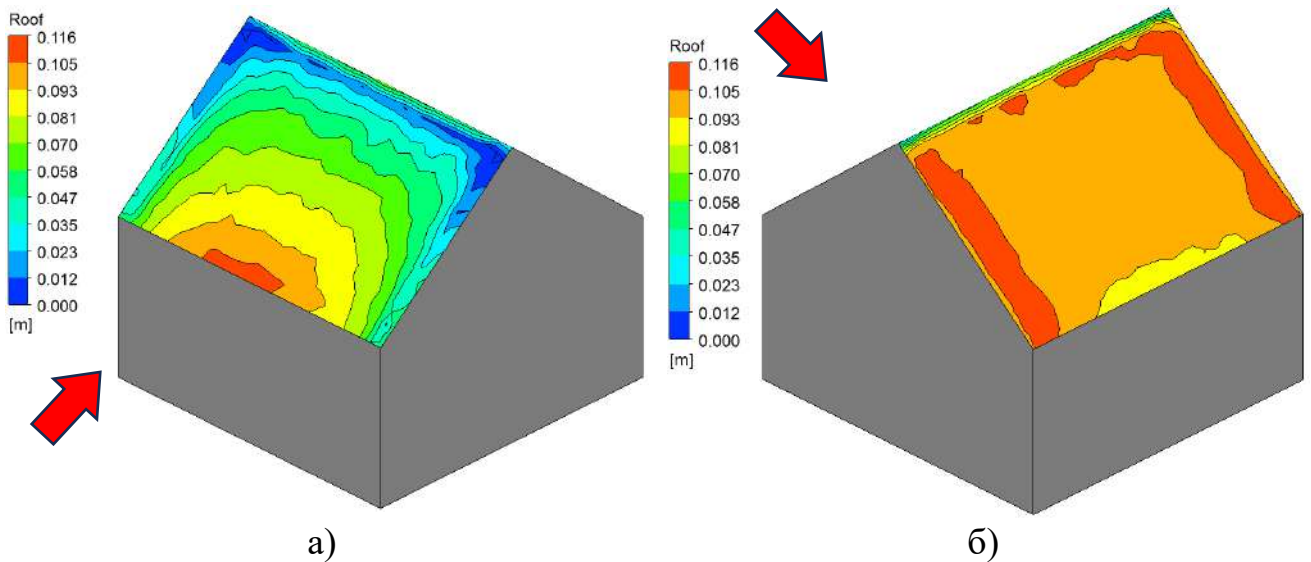


Рисунок 40 – Численное моделирование снегонакопления на двускатной крыше

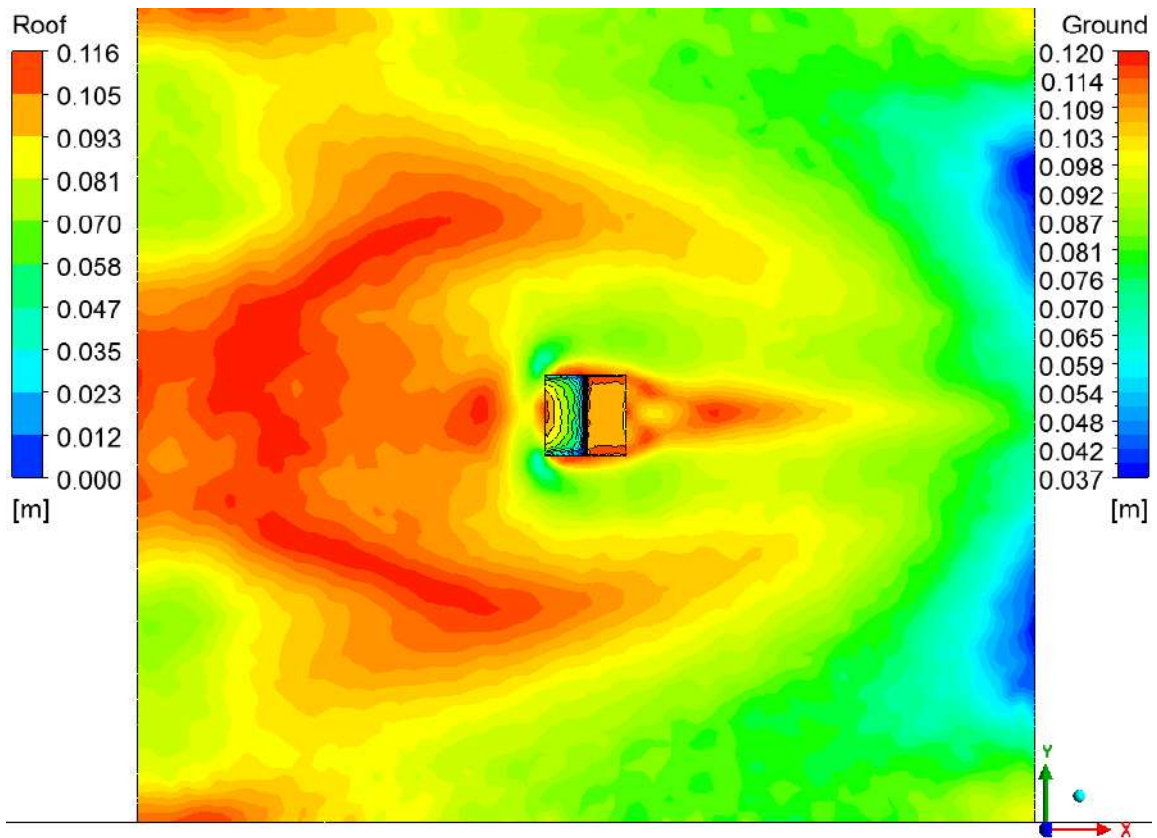


Рисунок 41 – Рассчитанное снегонакопление вокруг и на покрытии модели  
(стрелкой показано направление набегающего потока)

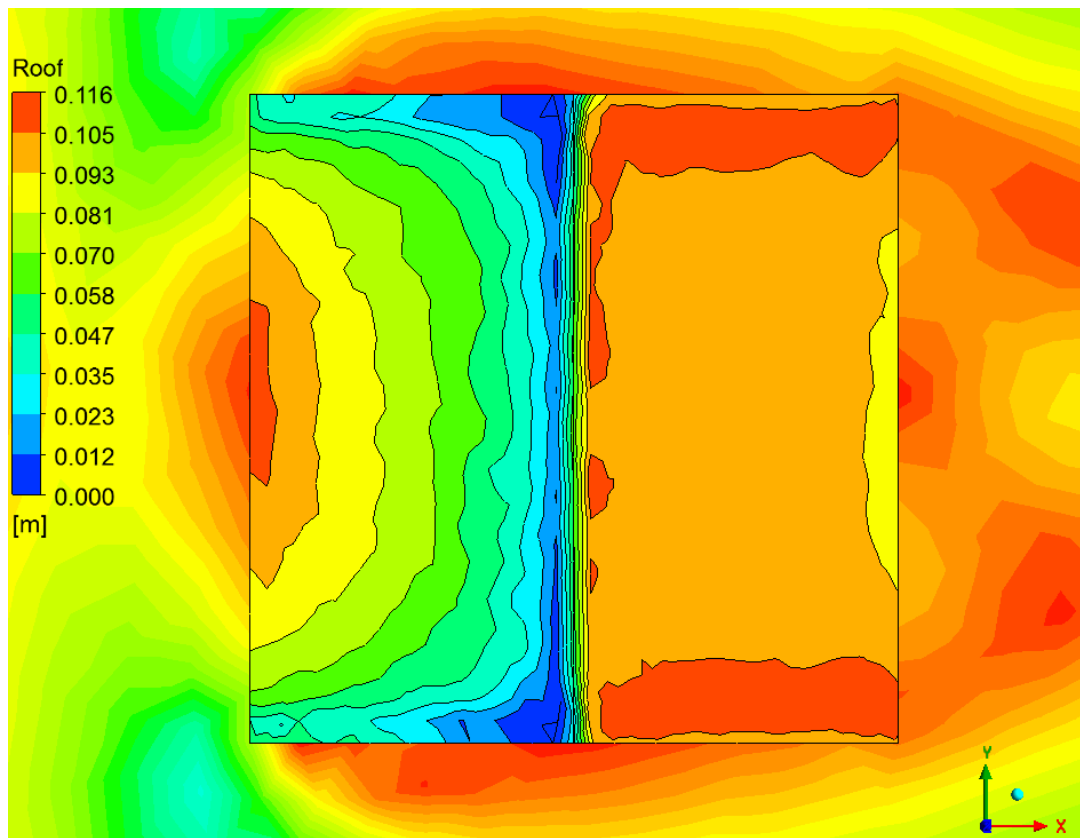


Рисунок 42 – Рассчитанное снегонакопление на покрытии модели

Таблица 12 – Сравнение интегральных значений моделируемого коэффициента формы по результатам физического и численного моделирования с нормами

		$H_{ground}$ , см	$\mu_{ww}$ (с наветренной стороны)	$\mu_{lw}$ (с подветренной стороны)
Моделирование	Физическое	10.5	0.88	1.13
	Численное (формула 77)	8	0.73	1.27
Нормативное распределение			0.75	1.25
Расхождение с численным моделированием, %			2.7	1.6

### Выводы по главе 3

1. С применением разработанной численной методики моделирования снегонакопления в нестационарной и стационарной постановке были решены две верификационные задачи – обтекание отдельно стоящего куба и расчет снегонакопления на двускатной крыше.

2. Методика в обеих постановках успешно продемонстрировала способность качественно моделировать характерные снегоотложения вокруг куба – наветренный и подветренный сугробы и подковообразный след от потока уноса. Также с ее помощью было получено, но не оценено распределение снега на поверхности самого куба.

3. Решение задачи снегонакопления на двускатной крыше показало, что с помощью методики в нестационарной постановке возможно получение лишь частных случаев снегонакопления, не обязательно повторяющих нормативное распределение (хотя это и возможно), а с помощью методики в стационарной постановке результат получается ближе к физическому моделированию, чем к рекомендациям норм.

4. На основании верификации методики можно подтвердить высказанное ранее утверждение, что результаты, полученные с ее помощью, не могут использоваться напрямую, в «чистом виде». Для назначения расчетного коэффициента формы для конкретного покрытия необходимы дополнительные мероприятия по обработке результатов моделирования с учетом рекомендаций строительных норм, описанные ранее.

## ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ НА ПОКРЫТИЯХ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

### 4.1 Постановка задач расчетных исследований

Апробация численной методики проводилась для реальных большепролетных и уникальных зданий и сооружений, для которых, в силу сложной геометрии покрытия, требовалось отдельное исследование процессов снегонакопления.

Всего для апробации методики было выбрано три объекта. Первый – здание цеха №104 объекта «Центр строительства крупнотоннажных морских сооружений (ЦСКМС)» (далее – «Цех №104») – представляет собой «стандартное» промышленное большепролетное сооружение: развитое преимущественно в одном направлении, небольшой высоты относительно наибольшего измерения, с двускатной крышей. Вдобавок к рекомендациям схемы Б.1 Приложения Б к СП 20.13330.2016 по заданию расчетного коэффициента формы  $\mu$  для такой крыши, интерес представляют локальные снегоотложения, которые, в силу большой протяженности покрытия, могут формироваться по его длине и оказывать местную повышенную нагрузку на несущие конструкции. Второй объект – Главный корпус Подмосковского образовательного молодежного центра «Мастерская управления “Сенеж”» (далее – «Агора») – относится к гражданским большепролетным зданиям, для которого, в силу уникальной геометрии покрытия, невозможно задать расчетный коэффициент формы  $\mu$ , руководствуясь исключительно рекомендациями СП 20.13330.2016, и также требуются дополнительные исследования. В отличие от первого объекта, конструктивно покрытие «Агоры» представляет собой купол, расходящийся на шесть плоских прямоугольных «лучей» меньшей высоты, чем центральная часть, и в характерных поперечных сечениях имеет форму, близкую к кривой типа  $y = ae^{-bx^2}$ . Наконец, третий объект – Серфинг-парк «Волна» (далее – «Волна») – является уникальным большепролетным сооружением для размещения крытого бассейна с установкой волногенерации. Сложносочиненное покрытие «Волны», в плане приближенно имеющей форму ромба со скругленными углами,

состоит из пяти характерных зон: центральной части, имеющей форму вытянутого в одном направлении гиперболического параболоида; двух симметричных частей, соединяющих центральную со сторонами «ромба»; и двух «закрывающих» частей, в одной из которых предусмотрена выемка для расположения технологического оборудования. Очевидно, что для покрытий такого рода Приложением Б к СП 20.13330.2016 не предусмотрены отдельные схемы.

В силу относительной простоты покрытия «Цеха №104» и необходимости изучить возникновение локальных снегоотложений, моделирование снегонакопления для его покрытия проводилось в нестационарной постановке. Сложная форма покрытий «Агоры» и «Волны», однако, требовала проведения многовариантных расчетов с учетом влияния окружающей застройки и рельефа, поэтому для их покрытий моделирование проводилось в стационарной постановке.

## **4.2 Численное моделирование снеговой нагрузки на покрытие большепролетного сооружения («Цех №104») в нестационарной постановке**

### *4.2.1 Описание расчетной модели*

Здание «Цеха №104» (участка изготовления металлоконструкций) – одноэтажное, каркасное, прямоугольное в плане с размерами 328×90 м. Высота здания – 41 м. Несущие конструкции здания стальные. Основные колонны двух- и четырехветвевые. ОпираНИЕ стальных колонн на фундамент является жестким в поперечном направлении и шарнирным в продольном направлении.

Здание оснащено тяжелыми мостовыми кранами. Технологическим процессом предусмотрена работа шести кранов в здании, грузоподъемность каждого составляет 40 т. Здание отапливаемое. Ограждающие конструкции здания – панели типа «сэндвич».

Участок строительства расположен на акватории и береговой части Кольского залива. Участок акватории приурочен к нижней морской террасе Кольского залива и в меньшей степени к устью р. Белокаменка. Представляет собой площадку террасы (частично осушаемую во время отлива), характеризующуюся плавным нарастанием глубин по мере удаления от берега (абс. отм. 0 – минус 4 м), и бровку,

с резким увеличением глубин (до минус 26 м). Абсолютные отметки на суше изменяются от 30 до 0 м.

Участок строительства, расположенный в с. Белокаменка Кольского района Мурманской области, согласно [64] относится к V снеговому району (нормативный вес снегового покрова – 3.2 кПа).

Обтекание вокруг «Цеха №104» (рисунок 39) моделировалось в прямоугольной расчетной области размером  $519 \times 953 \times 125$  м двухфазным потоком в эйлеровой постановке со следующими характеристиками:

- профиль скорости ветра – логарифмический (82);
- основная (несущая) фаза – воздух,  $\rho_a = 1.225 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu_a = 1.79 \times 10^{-5} \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ ;
- вторичная (несомая) фаза – лед с варьирующейся плотностью,  $\mu_i = 1.72 \times 10^{-5} \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ ;
- насыпная плотность несомой фазы –  $300 \text{ кг/м}^3$ , средний диаметр частиц – 10  $\mu\text{м}$ .
- внешние условия: давление – 1 атм, ускорение свободного падения –  $9.81 \text{ м/с}^2$ .

Задание профиля скорости и перемещение узлов расчетной сетки осуществлялось с помощью специальных пользовательских функций, написанных на языке С. Аэродинамический домен (рисунок 46) формировался из конечнообъемной сетки (рисунки 44 и 45), созданной с помощью ANSYS Meshing.

#### 4.3.2 Параметры расчета

Численное моделирование снеговых нагрузок выполнялось в программном комплексе ANSYS Fluent в нестационарной постановке, в течение 40 мин физического времени с шагом 1 с. Для моделирования турбулентности использовался подход *URANS* – разрешающая *k-ε* модель с применением масштабируемой функции стенки (Scalable Wall Function). Напряжение сдвига на покрытии вычислялось программным комплексом в ходе выполнения расчета.

Полный перечень значений параметров приведен в таблице 13.



Таблица 13 – Значения параметров нестационарного расчета

Параметр	$u_*^0$ , м/с	$u_t$ , м/с	$z_0$ , м	$A\rho_a$	$w_f$ , м/с	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	$t_{расч}$ , с	$\Delta t$ , с
Значение	0.25	0.04	0.1	$1 \cdot 10^{-4}$	0.5	150	2400	1

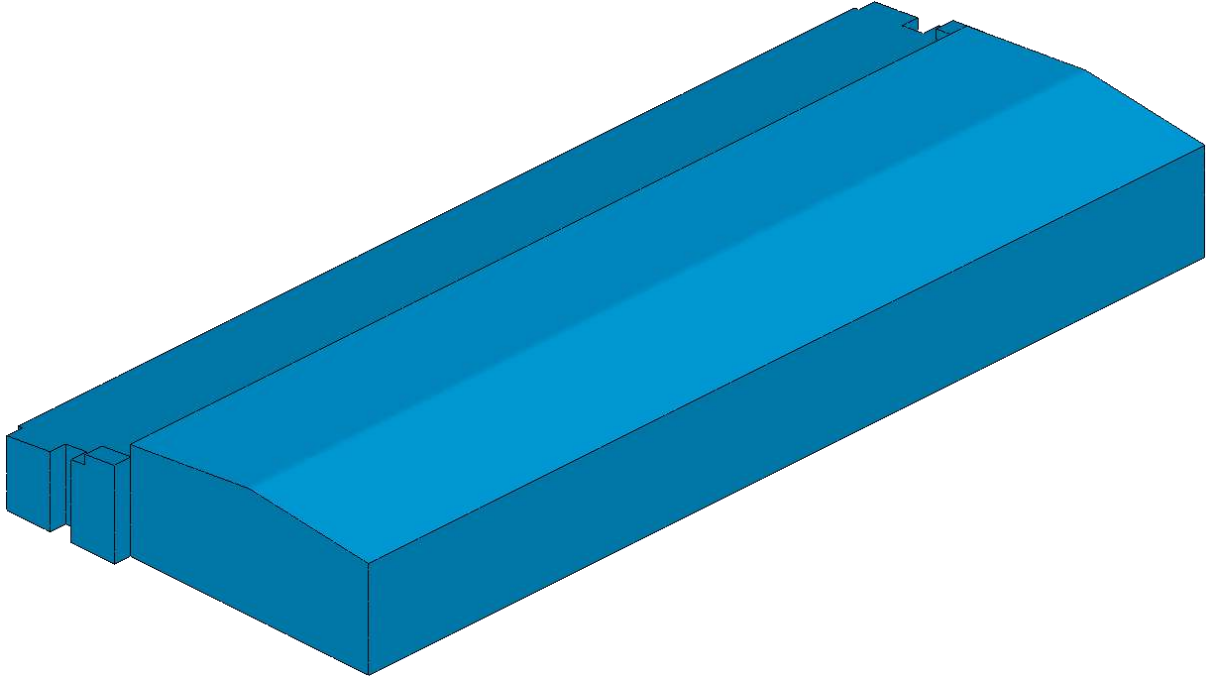


Рисунок 43 – Геометрия Цеха №104 (с учетом примыкающих цехов)

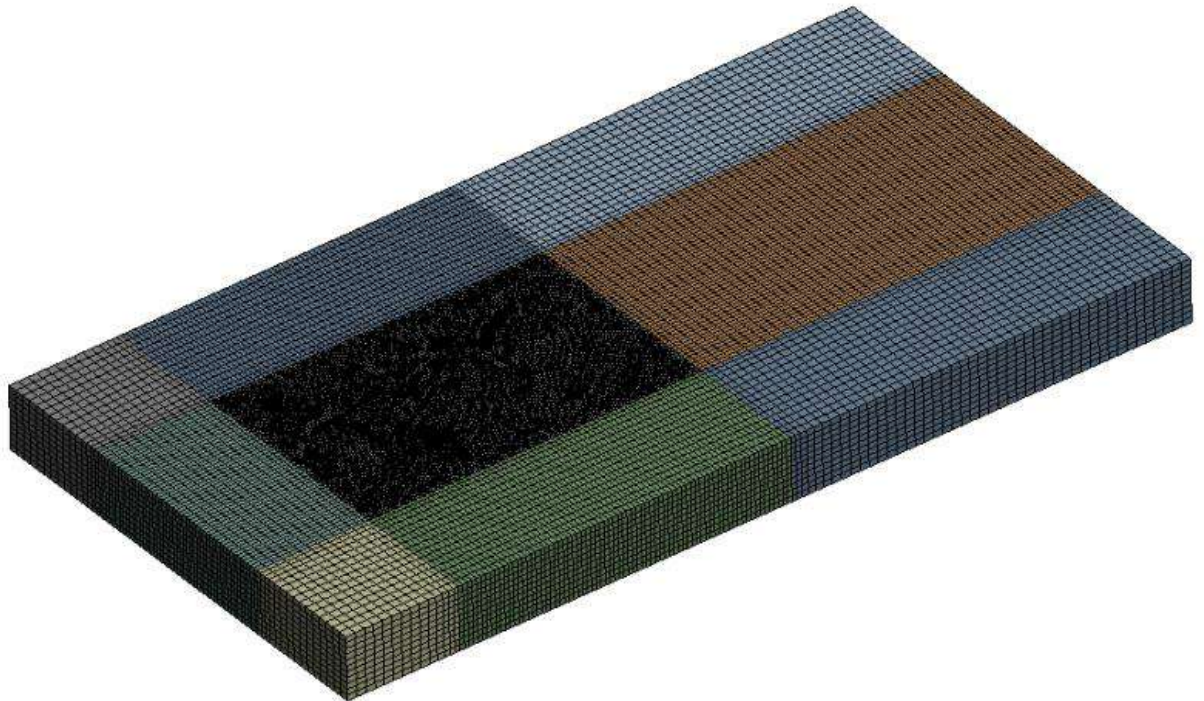


Рисунок 44 – Общий вид расчетной сетки аэродинамического домена

Количество ячеек конечнообъемной модели – 1004709

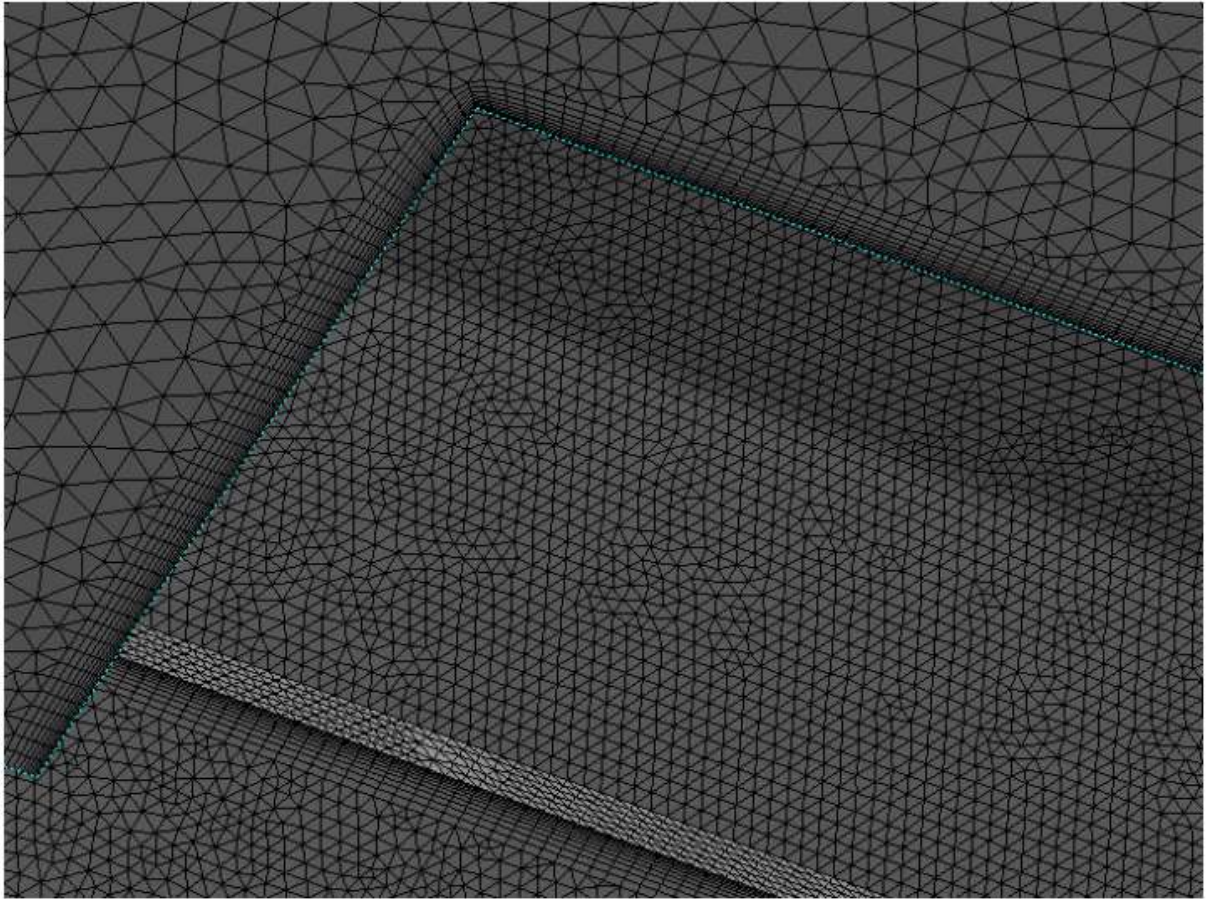


Рисунок 45 – Пограничный слой расчетной сетки вблизи исследуемого объекта

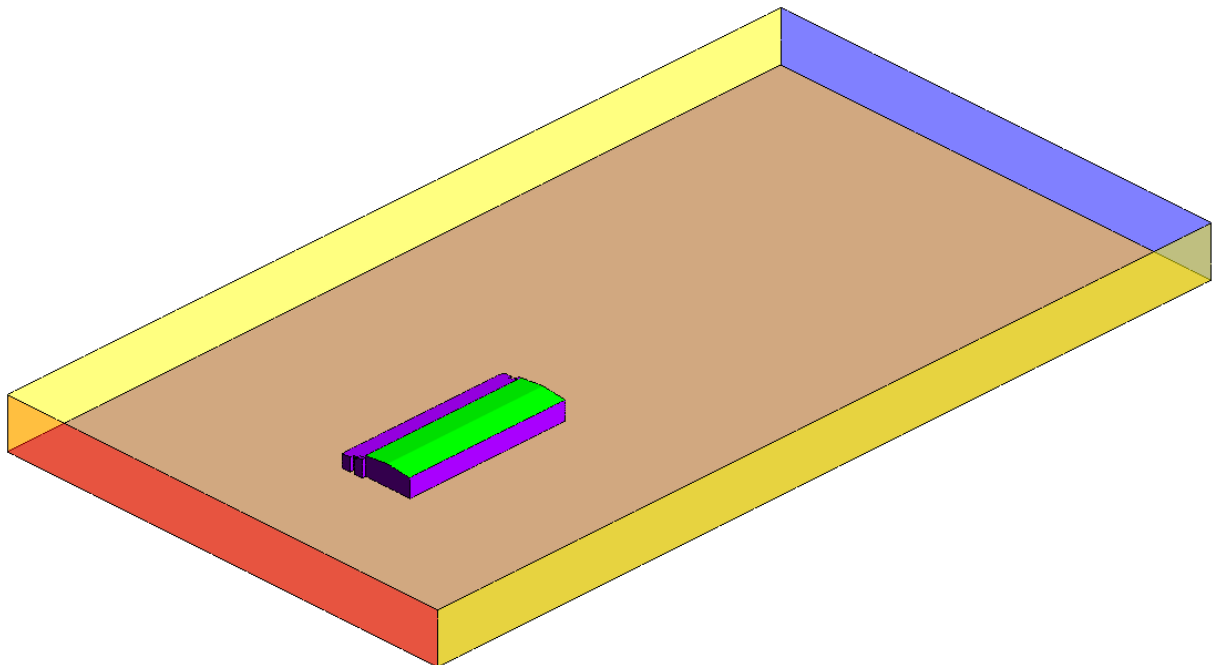


Рисунок 46 – Схема расчетной области

Таблица 14 – Граничные условия для расчетной области

<b>Зона</b>	<b>Цвет (рис. 46)</b>	<b>Описание</b>	<b>Граничное условие</b>	<b>Деформация узлов сетки</b>
<b>Inlet</b>	Красный	Вход/источник	Профиль скорости, доля снега $1e-4$	Нет
<b>Outlet</b>	Синий	Выход/сток	Отн. давление 0 Па	Нет
<b>Wall</b>	Зеленый	Поверхности снегонакопления	Стенка с прилипанием	Да
<b>Symmetry</b>	Желтый	Симметрия	Стенка без прилипания (с проскальзыванием)	Нет
На входе: интенсивность турбулентности 5%, отношение вязкости 10.				

#### 4.3.3 Анализ полученных результатов

В результате расчетов были получены высокочувствительные к входным параметрам картины неравномерного снегонакопления. Во всех расчетных случаях отмечено существенное влияние снегопереноса, играющего в данной задаче ключевую роль в перераспределении снега по всей площади покрытия, причем в последнем случае (рисунок 47, 3) и вовсе получен почти полный унос снега с кровли здания. Таким образом, вновь получают частные картины снегонакопления, соответствующие различным частным случаям погодных условий, при которых происходит формирование снегового покрова. Эти картины далеки от нормативного распределения, которое, вообще говоря, должно быть получено путем обобщения результатов многих снегопадов в течение многих периодов наблюдения. И хотя частное распределение при некоторых значениях начальных параметров теоретически могло бы повторить нормативное, в общем случае оно не должно его повторять. Результаты и верификации, и апробации численной методики в нестационарной постановке явно свидетельствуют об этом.

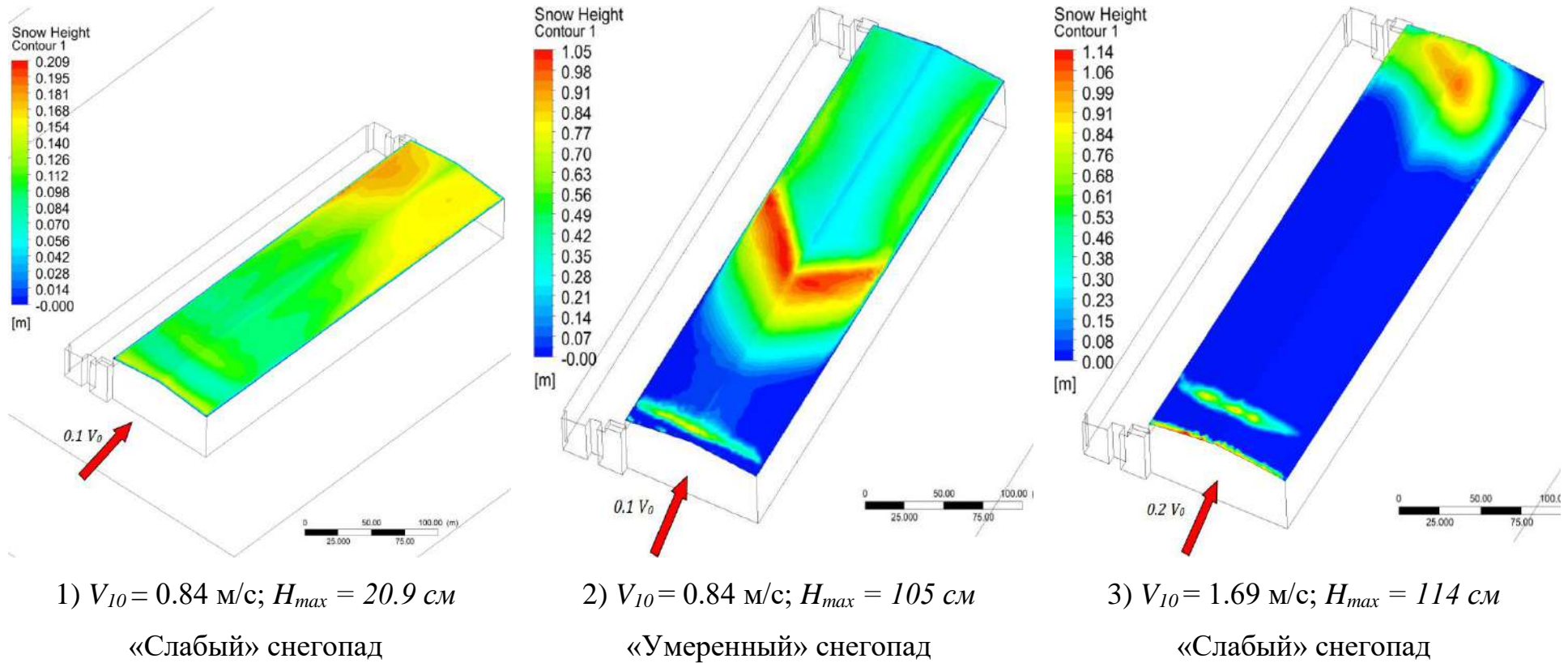


Рисунок 47 – Рассчитанное снегонакопление на покрытии для трех расчетных случаев в момент времени  $t = 2400$  с

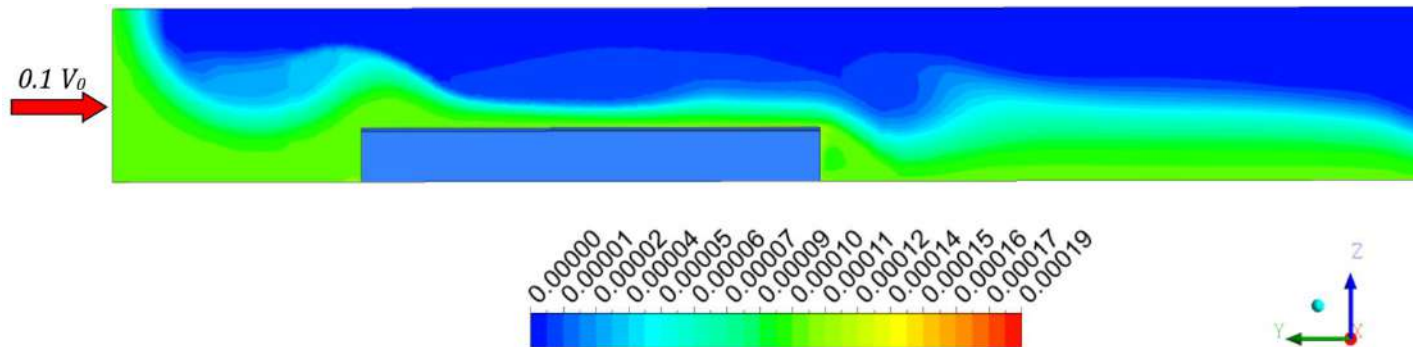


Рисунок 48 – Концентрация снега в расчетной области в момент времени  $t = 2400$  с для расчетного случая 1



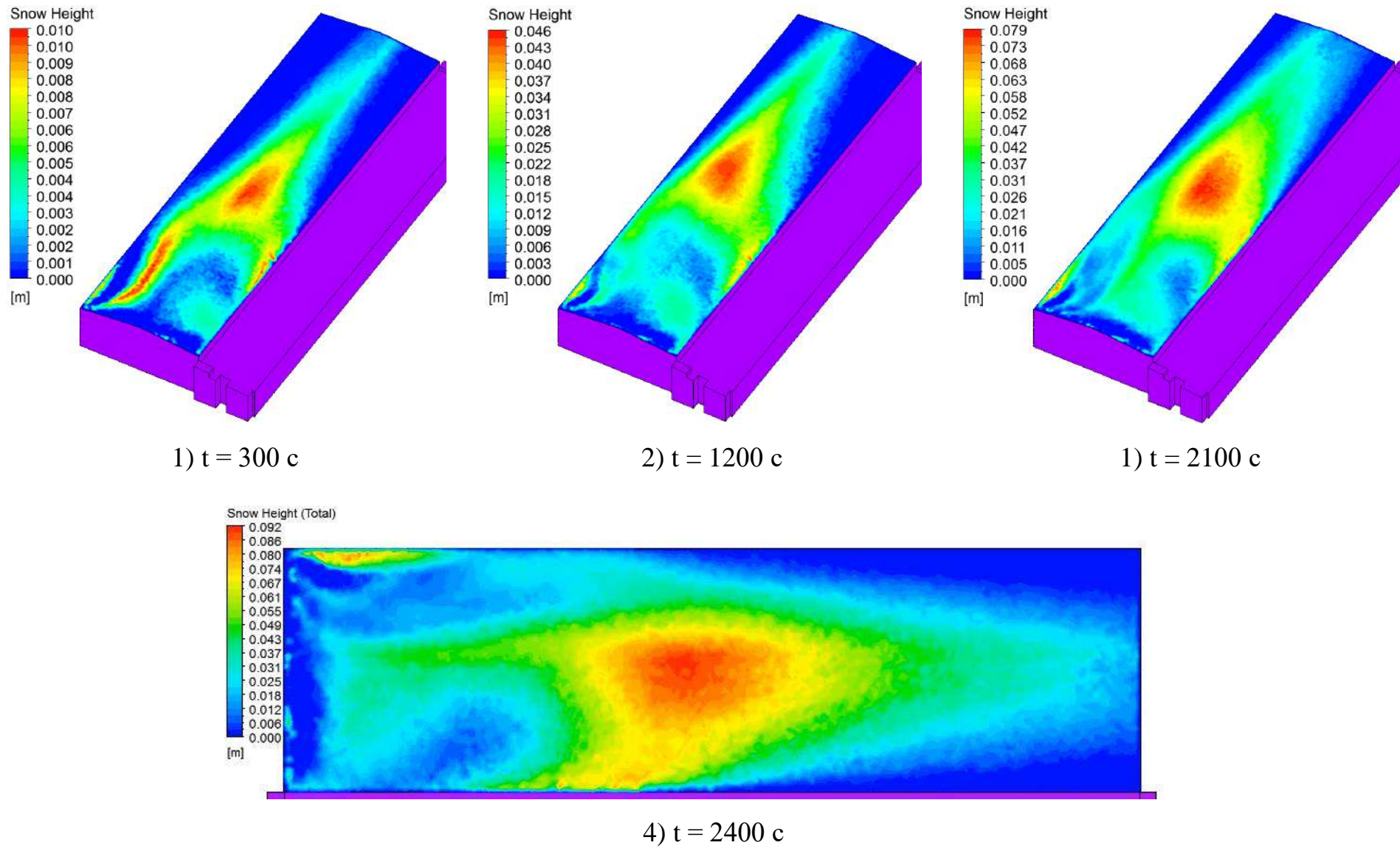


Рисунок 49 – Рост снегового покрова во времени

Таблица 15 – Сводная таблица результатов численного моделирования для цеха №104

<b>Расчетный случай</b> (см. рисунок 47)	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Характер снегопада	«Слабый»	«Слабый»	«Умеренный»
Скорость на высоте 10 м [м/с]	0.84	1.69	0.84
Высота снегового покрова [м]	0.21	1.14	1.05
Концентрация снежной фазы [%·10 <sup>-3</sup> ]	0.19	1.34	1.20
Распределение снега	Близкое к равномерному	Неравномерное	Неравномерное

В заключение следует отметить, что полученные результаты свидетельствуют о невозможности прямого использования данных моделирования нестационарного потока для определения расчетного коэффициента формы  $\mu$ . Применение методики в нестационарной постановке на данном этапе оправдано только в случае исследования частных случаев снегонакопления и локальных снегоотложений, возникающих при конкретных, жестко определенных условиях моделирования. Необходимость многократно варьировать эти условия для получения наборов распределения снегоотложений также делает применение методики в нестационарной постановке затруднительным в инженерной практике ввиду высокой ресурсоемкости вычислений и временных затрат на моделирование, обусловленных ей.

### 4.3 Численное моделирование снеговой нагрузки на покрытие большепролетного здания («Агора») в стационарной постановке

#### 4.3.1 Описание расчетной модели

Здание «Агоры» имеет сложную геометрическую форму в виде шести различных прямоугольных в плане частей, примыкающих к круглой в плане центральной части (рисунок 51). Покрытие «Агоры» плавное, в центре сферическое. Также с одной из сторон к нему примыкает навес, опирающийся на колонны.

Участок строительства объекта располагается г. Солнечногорск Московской области. С севера и северо-востока от объекта расположено озеро Сенеж, с юга и севера-запада – лес, а с востока – существующая малоэтажная застройка. В непосредственной близости от исследуемой «Агоры» проектировались значимые в аэродинамическом смысле здания и сооружения, которые учитывались при проведении расчетов.

Локальный рельеф местности в основном ровный, с уклоном в сторону озера. В радиусе 600 м от объекта наблюдается перепад местности до ~20 м, который является существенным для достаточно низкого исследуемого здания «Агоры» и также учитывался при математическом (численном) моделировании.

Согласно СП 20.13330.2016, площадка строительства находится в III снеговом районе (нормативное значение веса снегового покрова  $S_g = 1.5$  кПа).

Обтекание «Агоры» (рисунок 51) моделировалось однофазным потоком в цилиндрической расчетной области размером 600×100 м (рисунок 50). С применением численной методики в стационарной постановке было выполнено по десять расчетов с варьируемой скоростью входного потока для двух направлений ветра (180° и 210°; ввиду симметричности рассматриваемого здания) с учетом и без учета окружающей застройки. Согласно таблице 7.1 СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99\* .Строительная климатология» [65], средняя скорость ветра на высоте 10 м в зимний период для места расположения центра составляет 2.6 м/с. Моделирование проводилось в диапазоне скоростей от 1 м/с до 10 м/с с шагом 1 м/с. Концентрация снега  $C$  принята равной 5 г/м<sup>3</sup>. Данное значение соответствует умеренному снегопаду. Затем полученные распределения моделируемого коэффициента формы  $\mu_m$

были проанализированы для выявления наиболее неблагоприятных из них с точки зрения механической безопасности здания и обобщены в виде схем расчетного коэффициента формы  $\mu$ .

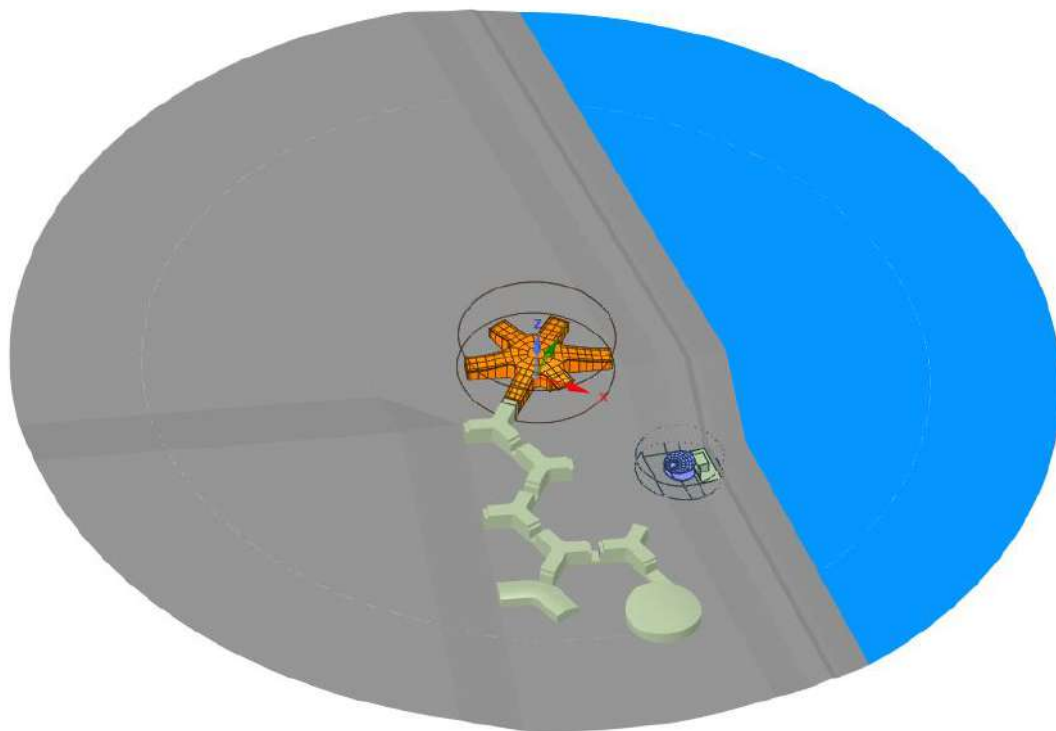


Рисунок 50 – Общий вид геометрической модели (оранжевым выделена «Агора»)

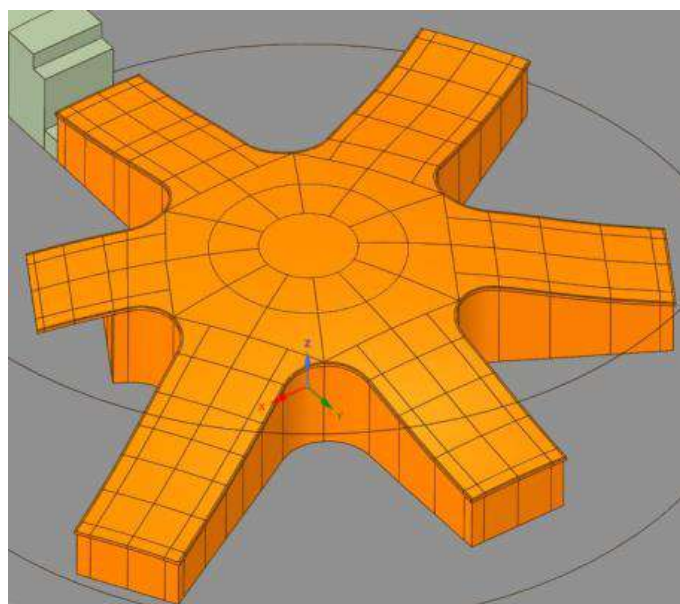


Рисунок 51 – Геометрия «Агоры»



Конечнообъемные сетки для выполнения расчетов формировались следующим образом. Геометрическая модель расчетной области с учетом окружающих объект застройку и рельеф местности (рисунок 50) создается в ANSYS SpaceClaim в виде цилиндрического объема воздуха радиусом 500 м и высотой 90 м. Здесь же происходит назначение компонент для вычисления снегонакопления на представляющих интерес поверхностях объекта и пост-обработки результатов в ANSYS CFD Post. Затем в ANSYS Meshing на основе геометрической модели создается расчетная сетка из конечных объемов тетраэдрической формы (рисунки 52 и 53) с параметрами, представленными в таблице 16.

Таблица 16 – Параметры расчетной сетки

Область	Размер поверхностных элементов, м	Размер объемных элементов, м
в радиусе 90 м от «Агоры»	0.5	1.5
в радиусе от 90 до 270 м	1.5	3.0
в радиусе от 270 до 500 м	3.0	6.0

Пограничный слой вокруг поверхностей «Агоры» дискретизировался рядом тонких (в нормальном к поверхности направлении) объемов со следующими параметрами: первый слой толщиной 3 см, последующие 14 слоев идут с нарастающей толщиной (каждый в 1.2 раза толще предыдущего).



Рисунок 52 – Общий вид расчетной сетки аэродинамического домена

Количество ячеек конечнообъемной модели – 4433090

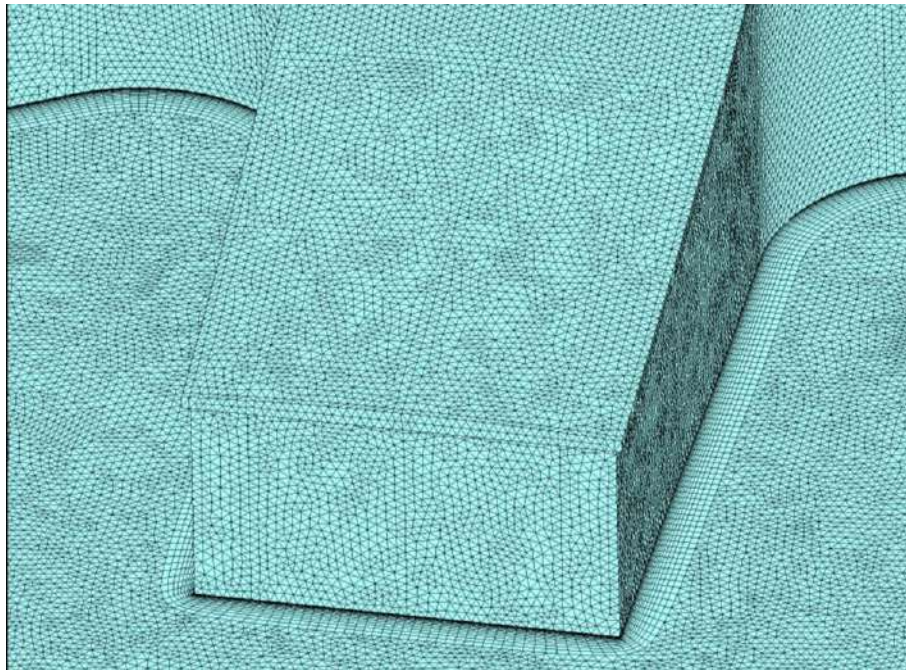


Рисунок 53 – Пограничный слой конечнообъемной сетки

### 4.3.2 Параметры расчета

Математическое (численное) моделирование снеговых нагрузок выполнялось в программном комплексе ANSYS CFX в стационарной постановке при 2-х направлениях ветра и 10-ти различных скоростях ветра (1÷10 м/с на высоте 10 м над уровнем земли). Для моделирования турбулентности использовался подход *RANS* – модель *k- $\omega$  SST* с применением стандартной функции стенки (Standard Wall Function). Максимальное количество итераций для расчета было назначено равным 150, максимальное значение невязок по непрерывности, давлению, турбулентным величинам и компонентам скорости –  $10^{-4}$ .

### 4.3.3 Анализ полученных результатов

В результате выполненного с применением численной методики в стационарной постановке моделирования снеговой нагрузки на покрытие «Агоры» были получены картины напряжений сдвига, скорости трения и моделируемого коэффициента формы  $\mu$ . Также, благодаря широкому диапазону начальных условий, была исследована зависимость коэффициента от скорости набегающего потока.

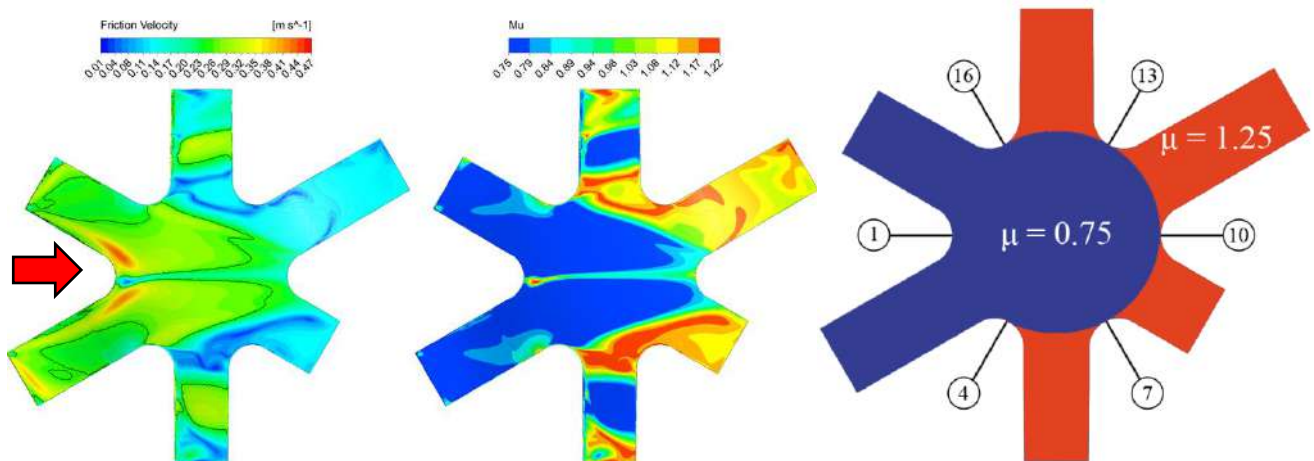


Рисунок 54 – Изополя скорости трения (слева), моделируемого (по центру) и расчетного (справа) коэффициента формы  $\mu$  для направления ветра  $180^\circ$  и скорости ветра 7 м/с



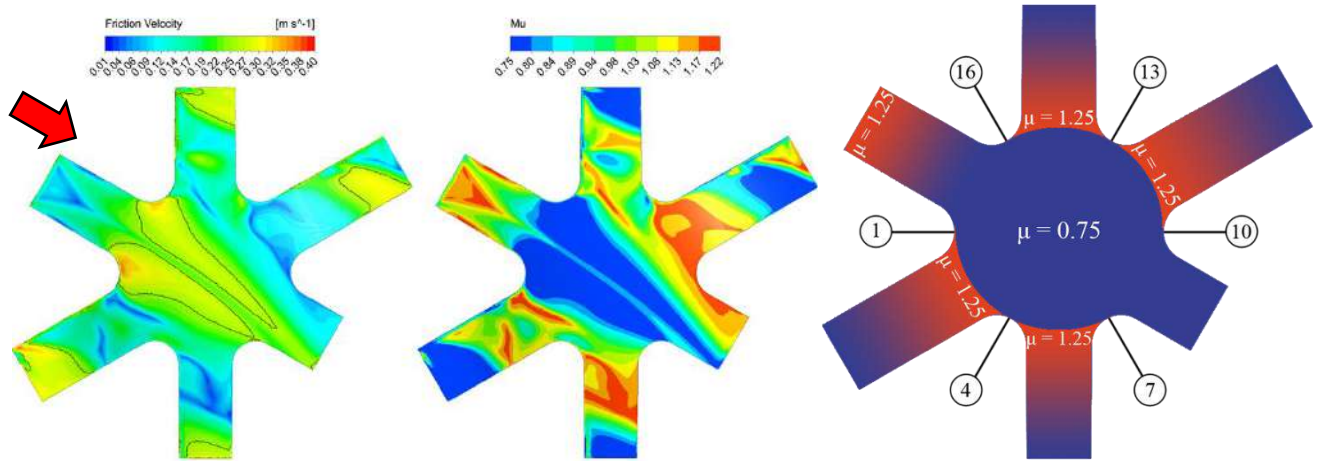


Рисунок 55 – Изополя скорости трения (слева), моделируемого (по центру) и расчетного (справа) коэффициента формы  $\mu$  для направления ветра  $210^\circ$  и скорости ветра  $7 \text{ м/с}$

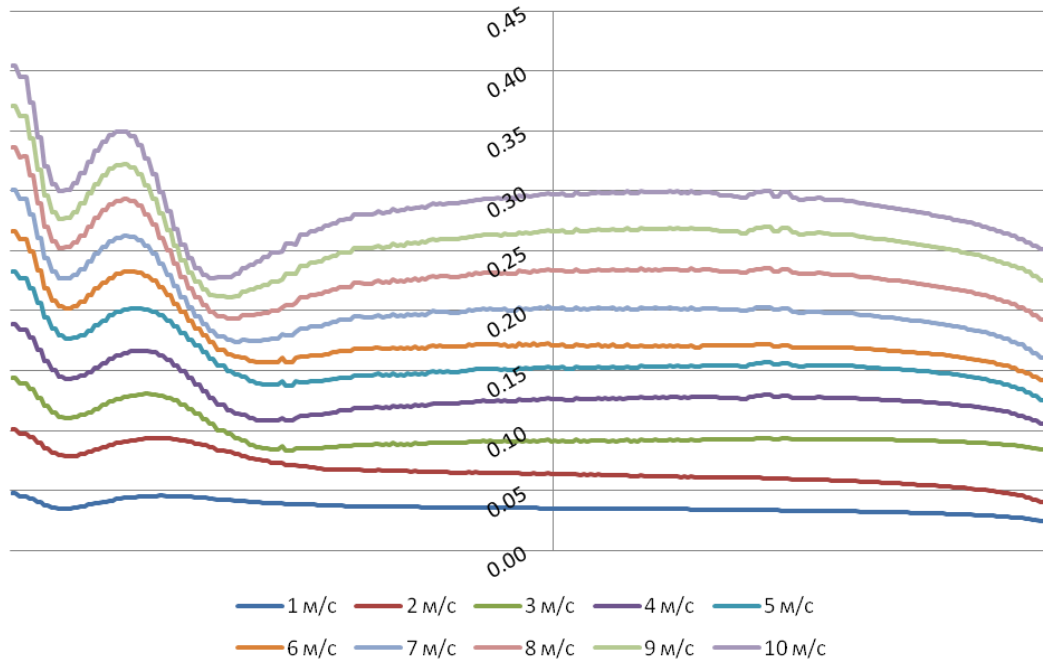


Рисунок 56 – Скорость трения ветрового потока по покрытию (м/с) в центральном сечении кровли «Агоры» вдоль направления ветрового потока для угла атаки  $180^\circ$  в каждом из десяти расчетных случаев (вертикальная ось пересекает центр купола). По мере увеличения скорости потока на входе проявляется характер профиля скорости трения на кровле

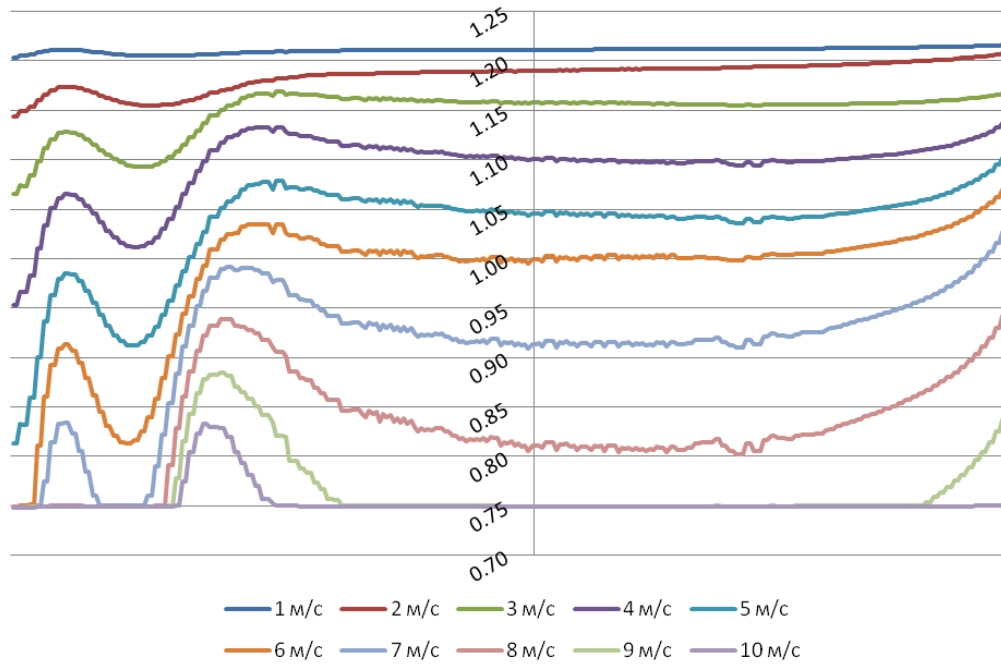


Рисунок 57 – Моделируемый коэффициент формы  $\mu_{fm}$  в центральном сечении кровли «Агоры» вдоль направления ветрового потока для угла атаки  $180^\circ$ , концентрации снега  $C = 5 \text{ г/м}^3$  и времени обдува  $T = 8 \text{ ч}$  (вертикальная ось пересекает центр купола)

Помимо основной задачи определения снеговых нагрузок на уникальное покрытие здания, моделирования «Агоры» позволили тщательно откалибровать методику в стационарной постановке. Так, было показано, что столь широкий диапазон скоростей на входе является избыточным, и для получения распределений моделируемого коэффициента формы  $\mu_m$  можно использовать меньшее количество скоростей (и, соответственно, расчетных случаев). Также было показано, что среднего значения  $0.25 \text{ м/с}$  для пороговой скорости трения достаточно для получения правдоподобных распределений снега для реальных зданий.

## 4.4 Численное и экспериментальное моделирование снеговой нагрузки на покрытие большепролетного здания («Волна»)

### 4.4.1 Описание расчетных и экспериментальных моделей

«Волна» представляет собой уникальное сооружение для размещения крытого серфинг-парка с профессиональной установкой волногенерации. Архитектурный облик здания определяется стеклянным фасадом и кровлей со световыми фонарями. Конструктивные решения включают использование вантовых конструкций для перекрытия пространств больших пролетов. Покрытие бассейна образуется тремя канатными сетями, натянутыми между металлическими фермами и фасадными балками.

Участок строительства расположен на территории Мневниковской поймы, ограниченной акваторией р. Москвы. Рельеф местности поймы преимущественно ровный, при этом противоположный берег представляет собой выраженный склон, что оказывает существенное влияние на формирование ветрового фронта. Местность на границах расчетной области, принятой в модели, в основном занята городской застройкой и густыми лесными массивами. Как и в случае с «Агорой», площадка строительства находится в III снеговом районе (нормативное значение веса снегового покрова  $S_g = 1.5$  кПа).

Обтекание «Волны» (рисунок 65, слева) моделировалось однофазным потоком в цилиндрической расчетной области размером  $1500 \times 1200$  м. Для этой задачи были рассмотрены два расчетных варианта: с учетом окружающей застройки и рельефа и без их учета. Это было сделано как для демонстрации влияния окружающей среды на распределение снега, так и для получения более разнообразных распределений в поиске наиболее неблагоприятных.

### 4.4.2 Условия проведения эксперимента и параметры расчета

Конечнообъемные сетки для выполнения расчетов формировались следующим образом. Геометрическая модель расчетной области с учетом окружающих объект застройку и рельеф местности (рисунок 66, справа) создается в ANSYS SpaceClaim в виде цилиндрического объема воздуха радиусом 1500 м и высотой

1200 м. Здесь же происходит назначение компонент для вычисления снегонакопления на представляющих интерес поверхностях объекта и пост-обработки результатов в ANSYS CFD Post. Затем в ANSYS Meshing на основе геометрической модели создается расчетная сетка из конечных объемов тетраэдрической, гексаэдрической, призматической и пирамидальной форм (рисунки 59-61) с параметрами, представленными в таблице 17.

Таблица 17 – Параметры расчетных сеток

Область	Размер поверхностных элементов, м	Размер объемных элементов, м
Модель 1 (~8.16 млн. КО)		
Объем в непосредственной близости от Объекта (отступ 1-2 м)	0.4	1.5
$R \leq 250\text{м}$	2.0	4.0
$250\text{м} \leq R \leq 500\text{м}$	4.5	9.0
$500\text{м} \leq R \leq 1000\text{м}$	6.0	15.0
$1000\text{м} \leq R \leq 2000\text{м}$	8.0	20.0
Верхняя часть всего объема	-	24.0
Модель 2 (~9.27 млн. КО)		
Объем в непосредственной близости от Объекта (отступ 1-2 м)	0.4	1.5
$R \leq 250\text{м}$	2.0	4.0
$250\text{м} \leq R \leq 500\text{м}$	4.5...6.0	9.0
$500\text{м} \leq R \leq 1000\text{м}$	6.0...8.0	10.0
$1000\text{м} \leq R \leq 2000\text{м}$	6.0...8.0	20.0
Верхняя часть всего объема	-	24.0

Пограничный слой вдоль поверхностей объекта, застройки и земли в обеих моделях дискретизировался рядом тонких (в нормальном к поверхности направлении) конечных объемов.

При численном моделировании было выполнено по три расчета для восьми направлений ветра ( $0^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $144^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $213^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $327^\circ$ ; всего 24 расчетных случая) с варьированием скорости входного потока и применением численной методики в стационарной постановке. С учетом выводов, сделанных в предыдущем случае, моделирование проводилось только для скоростей ветра 1 м/с, 3 м/с и 6 м/с. Для моделирования более длительного снегопада, при котором может быть получено неравномерное распределение снега, время отложения  $T_+$  было принято равным 6 ч, а время уноса  $T_-$  – 240 ч.

Разбиение покрытия «Волны» на участки для назначения расчетного коэффициента формы в соответствии с процедурой, указанной в разделе 2.5, проводилось с учетом подлежащих несущих конструкций (рисунок 58).

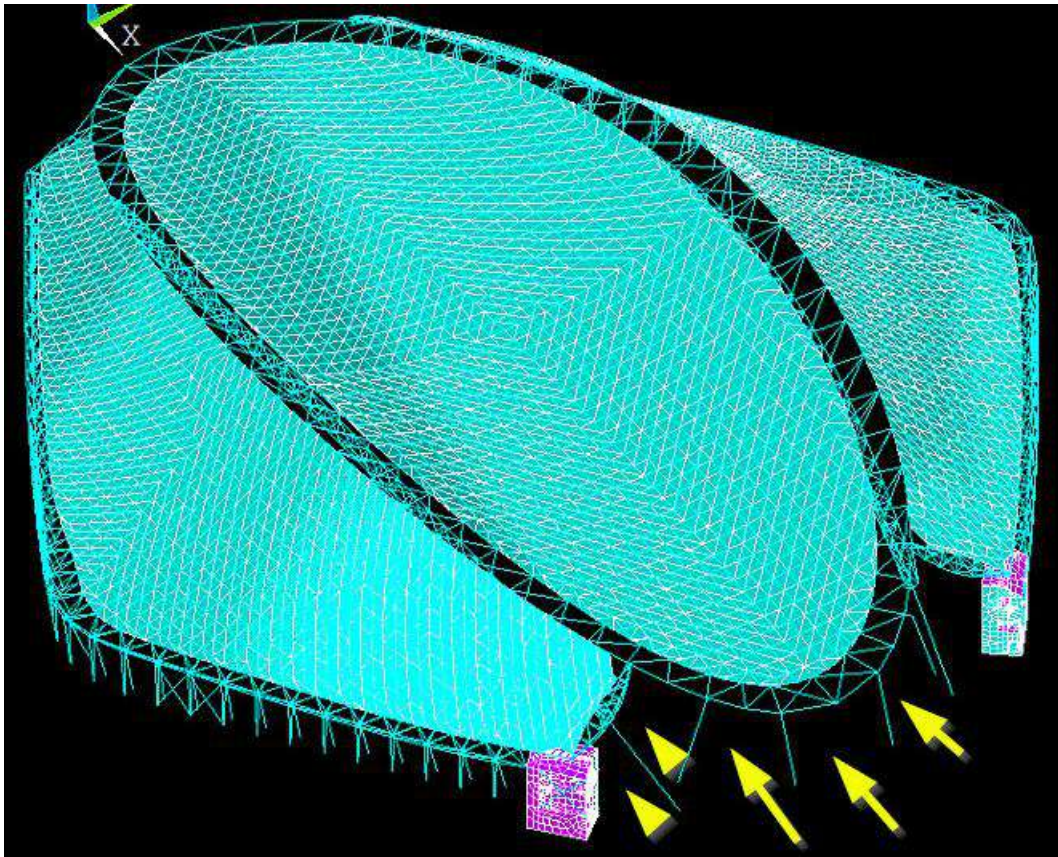


Рисунок 58 – Несущие конструкции покрытия «Волны» в ANSYS Mechanical



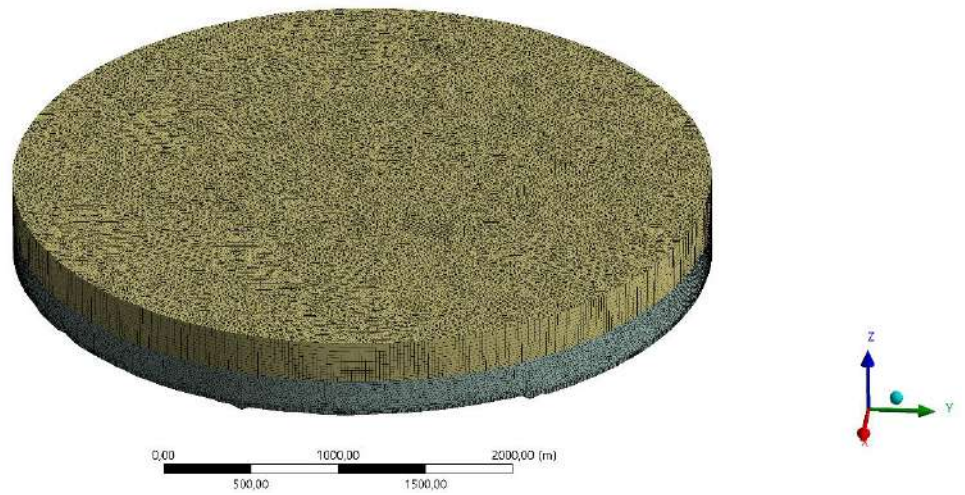


Рисунок 59 – Модель 1. Конечнообъемная сетка

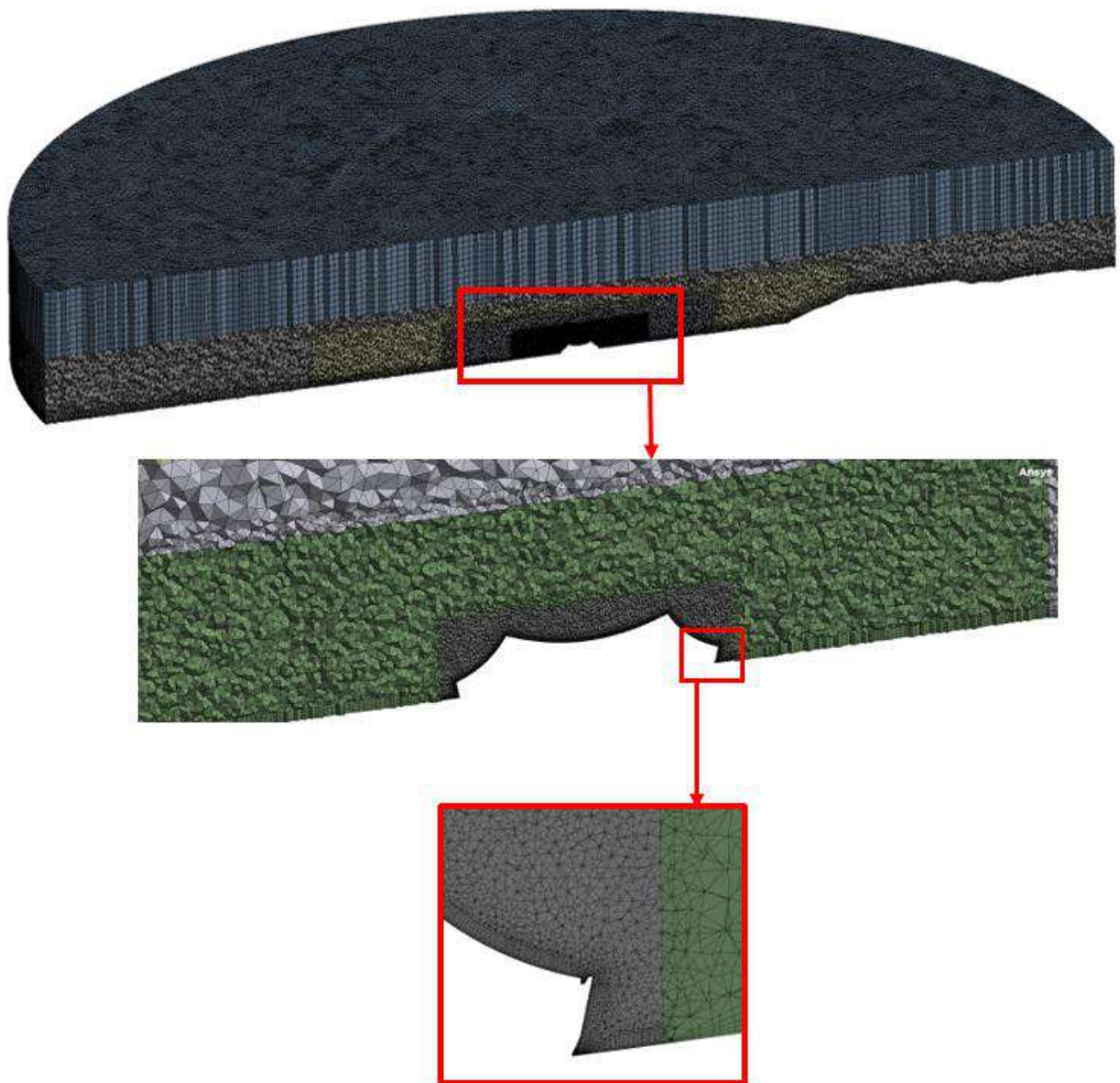


Рисунок 60 – Модель 1. Разрез конечнообъемной сетки

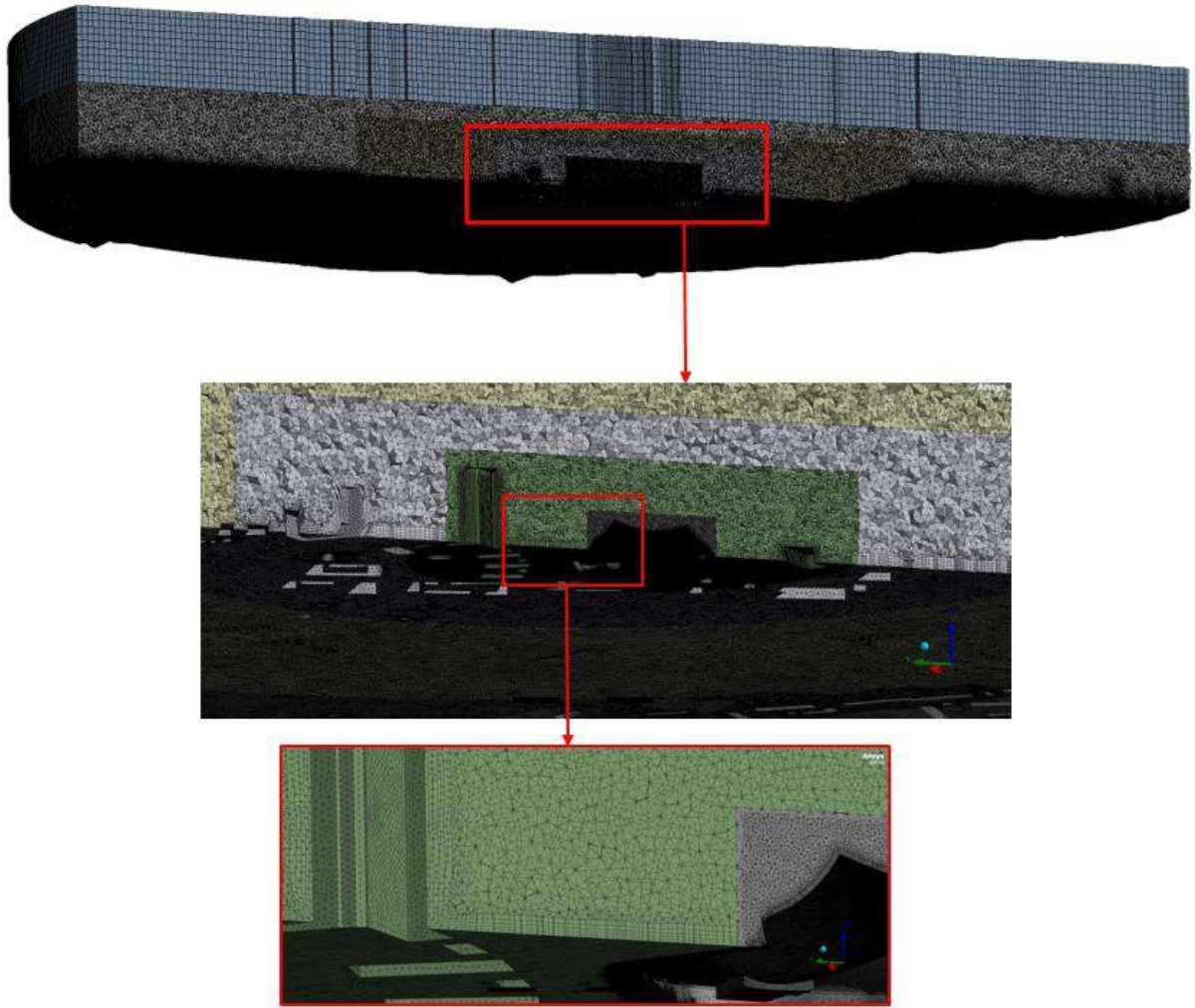


Рисунок 61 – Модель 2. Разрез конечнообъемной сетки

Для «Волны» также было выполнено и физическое (экспериментальное) моделирование в аэродинамической трубе, что позволило сравнить результаты, полученные двумя подходами, и выполнить их 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  $\mu_r$  для зон.



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. Геометрическая модель «Волны» и небольшого фрагмента окружающей застройки (рисунок 62) была изготовлена из ПВХ. С учетом размеров рабочей части трубы, в которой выполнялось моделирование, из условия загромождения потока был выбран максимально возможный масштаб макета – 1:250. Изменение направления ветрового потока выполнялось путем поворота макета на автоматическом поворотном столе, которым оборудована рабочая часть трубы.

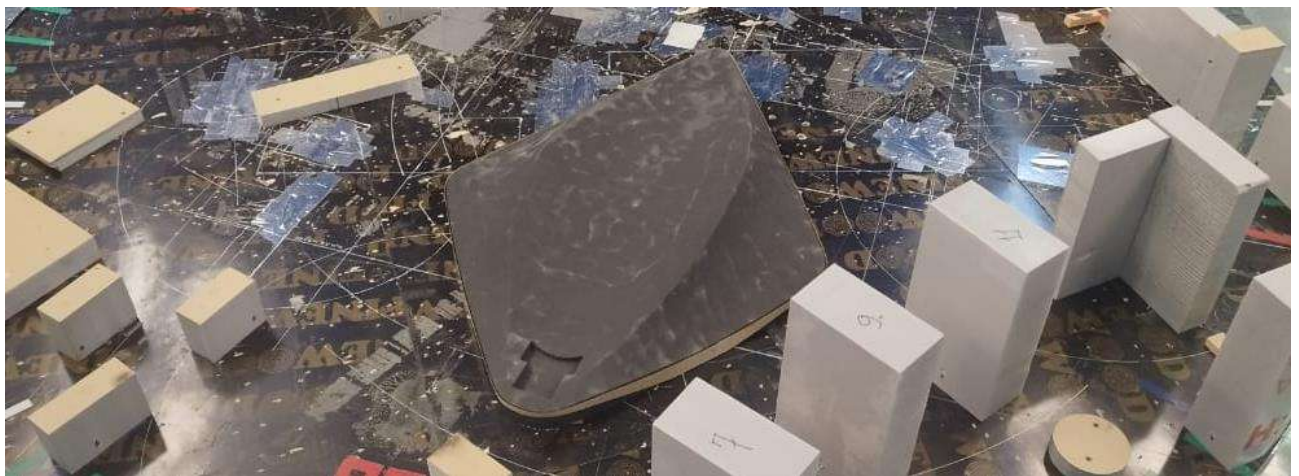


Рисунок 62 – Физическая модель «Волны» в окружающей застройке

#### 4.4.3 Анализ и сравнение полученных результатов

На рисунках 63-65 приведен пример распределений моделируемого коэффициента формы  $\mu$ , полученного численно и экспериментально, для одного направления ветра и без учета окружающей застройки. Аналогичные наборы данных были получены для всех исследуемых направлений ветра и расчетных вариантов. 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 67 и 68, слева и справа; рисунки 69 и 70, слева и справа). Также было отмечено схожее влияние окружающей застройки на полученные результаты.

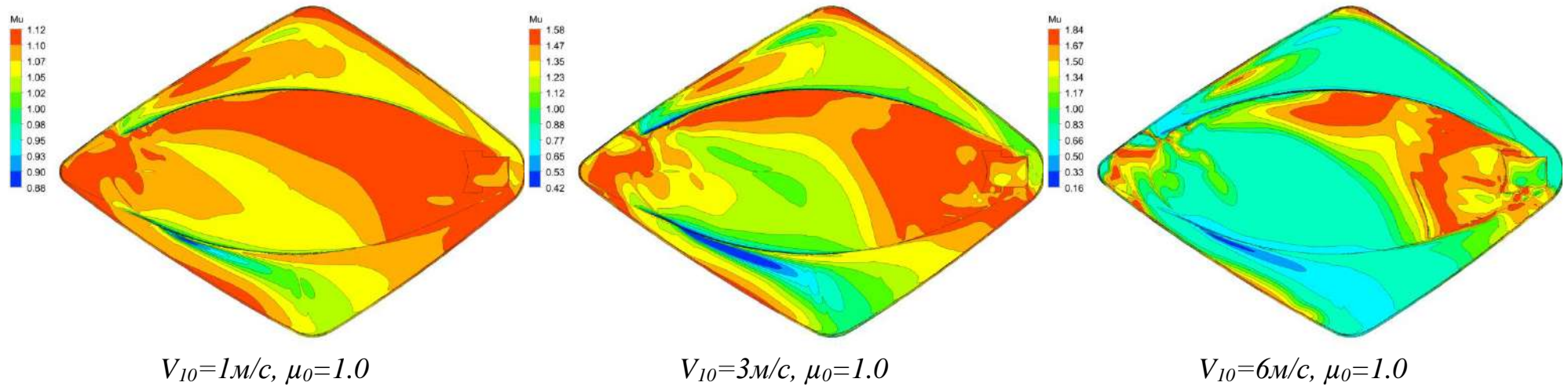


Рисунок 63 – Математически моделируемый коэффициент формы  $\mu_{\text{mm}}$ , направление ветра  $327^\circ$  (без учета застройки)



Рисунок 64 – Физически моделируемый коэффициент формы  $\mu_{\text{mr}}$ , направление ветра  $327^\circ$  (без учета застройки)

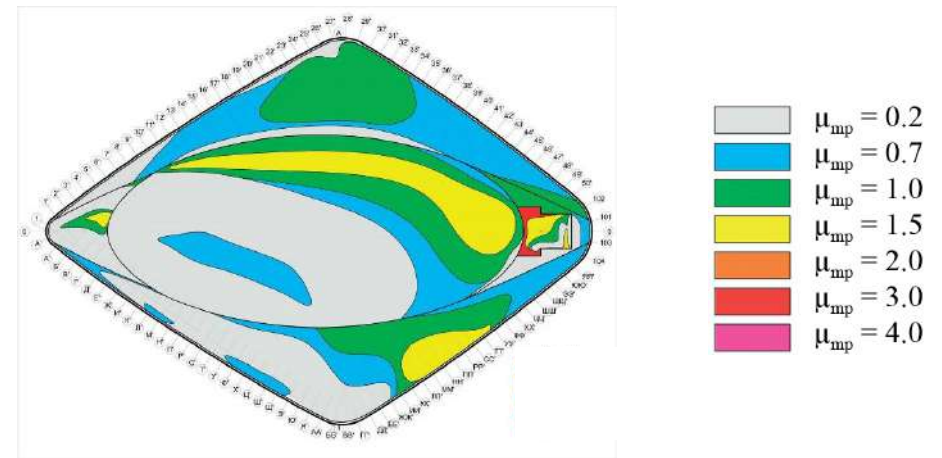


Рисунок 65 – Схема распределения снегоотложений по результатам физического моделирования, направление ветра  $327^\circ$  (без учета застройки)



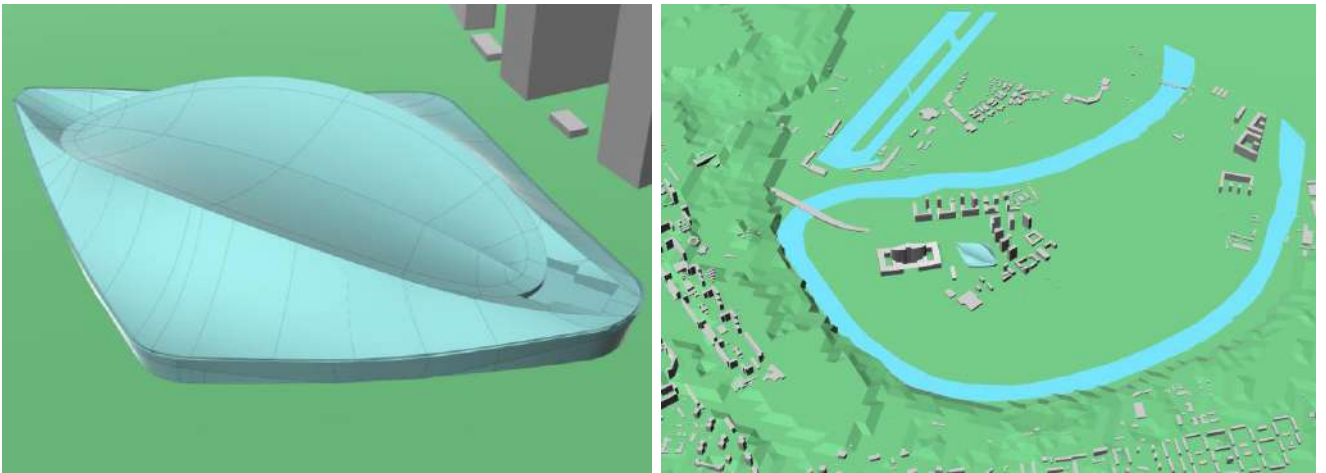


Рисунок 66 – Геометрия «Волны» (слева) и окружающие застройка и рельеф (справа)

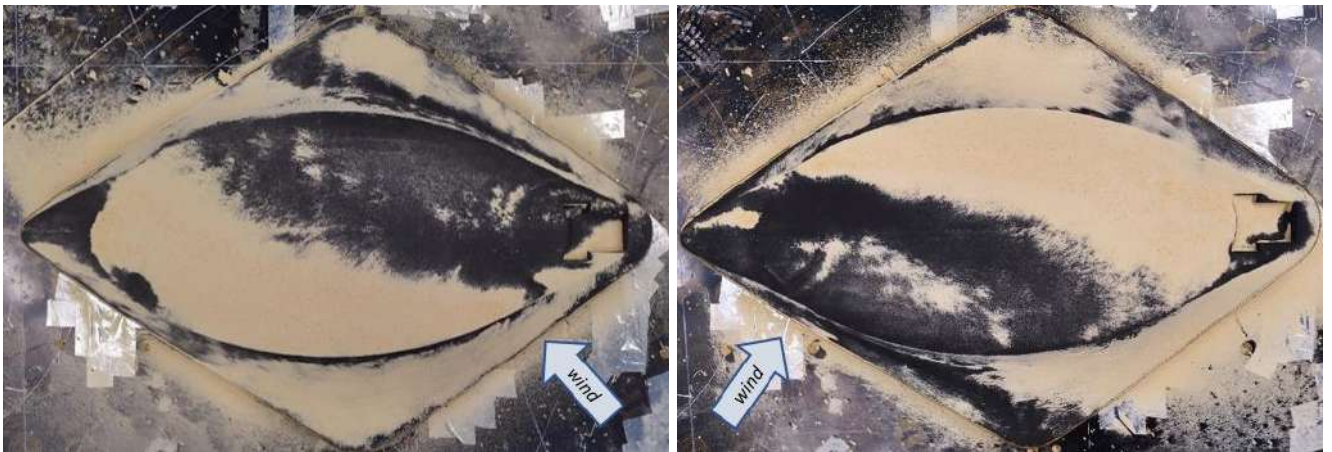


Рисунок 67 – Физическое моделирование снегонакопления для направлений ветра 144° (слева) и 213° (справа)

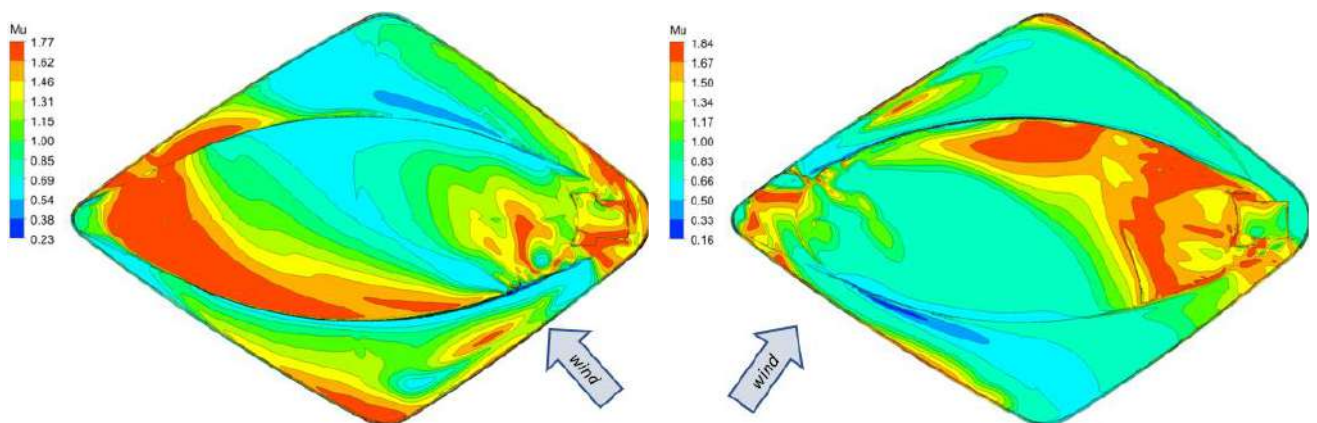


Рисунок 68 – Численное моделирование снегонакопления для направлений ветра 144° (слева) и 213° (справа)

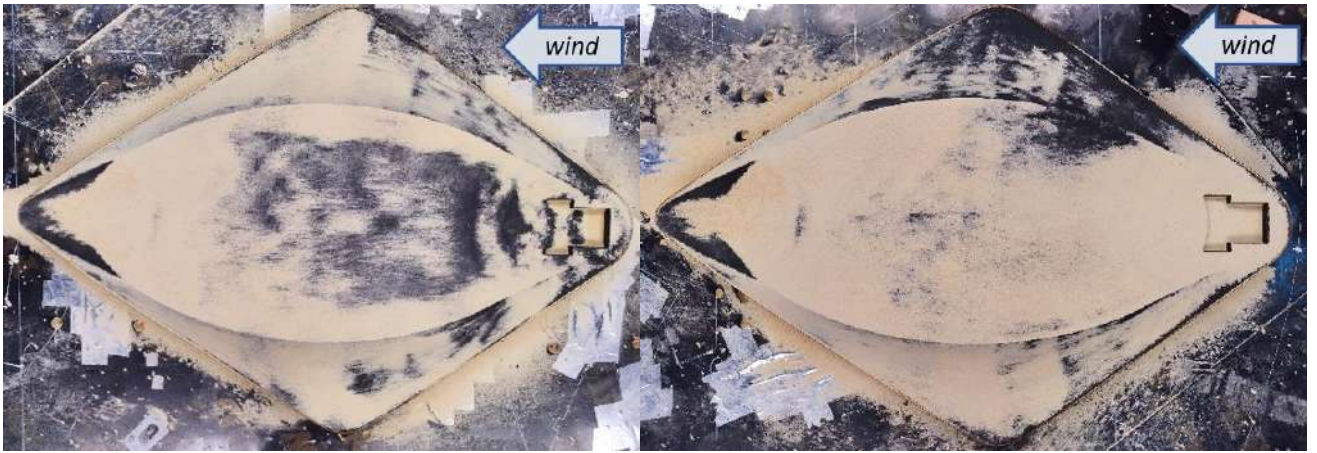


Рисунок 69 – Физическое моделирование снегонакопления для направления ветра  $90^\circ$  без учета (слева) и с учетом (справа) окружающей застройки

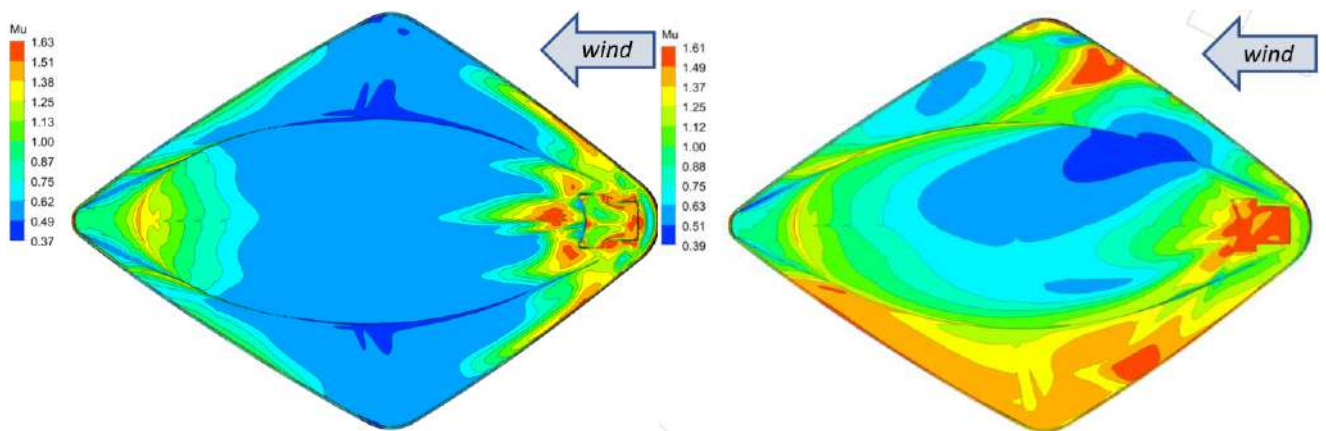


Рисунок 70 – Численное моделирование снегонакопления для направления ветра  $90^\circ$  без учета (слева) и с учетом (справа) окружающей застройки

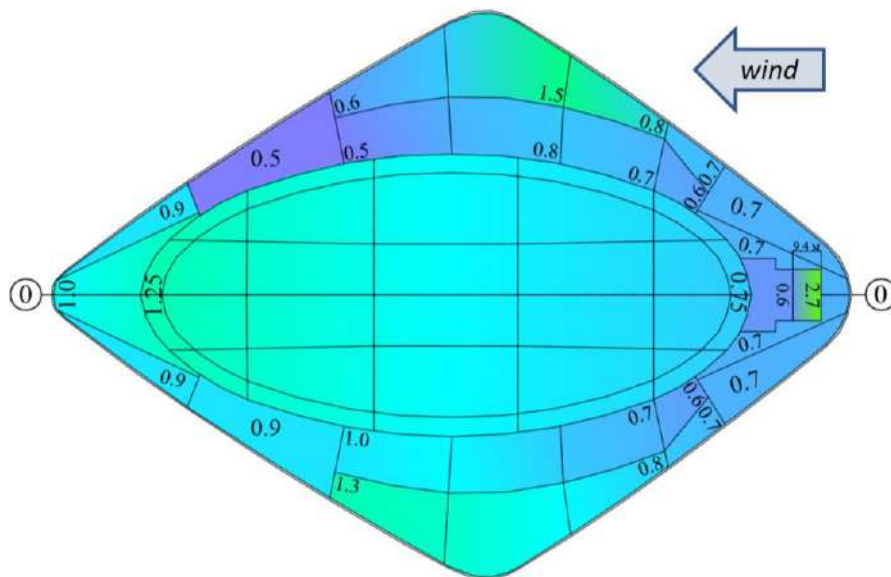


Рисунок 71 – Расчетный коэффициент формы  $\mu$  для направления ветра  $90^\circ$ , полученный по результатам физического и численного моделирований с учетом и без учета застройки и по рекомендациям строительных норм



Также при составлении схем учитывался тот факт, что для некоторых областей покрытия угол наклона нормали к поверхности земли превышает  $30^\circ$ . В соответствии с Приложением Б к СП 20.13330.2016, в таком случае значений коэффициента формы  $\mu$  должно определяться с помощью линейной интерполяции (для равномерно распределенной нагрузки, к примеру, от  $\mu = 1$  при  $30^\circ$  до  $\mu = 0$  при  $60^\circ$ ). Полная картина углов наклона нормали представлена на рисунке 72.

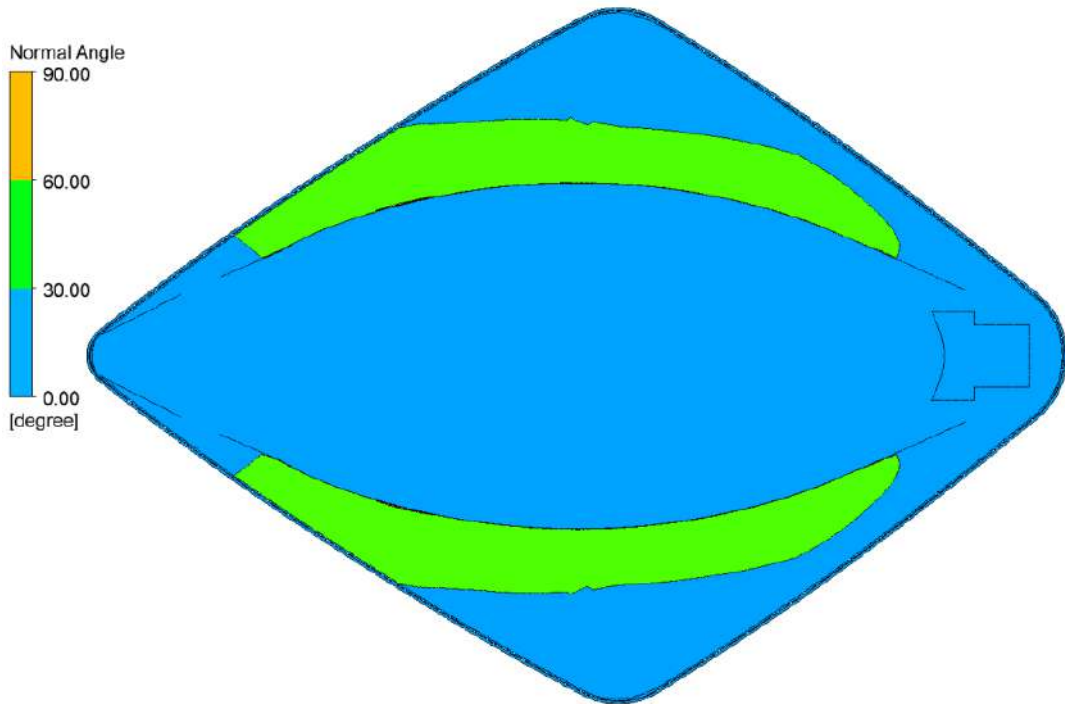
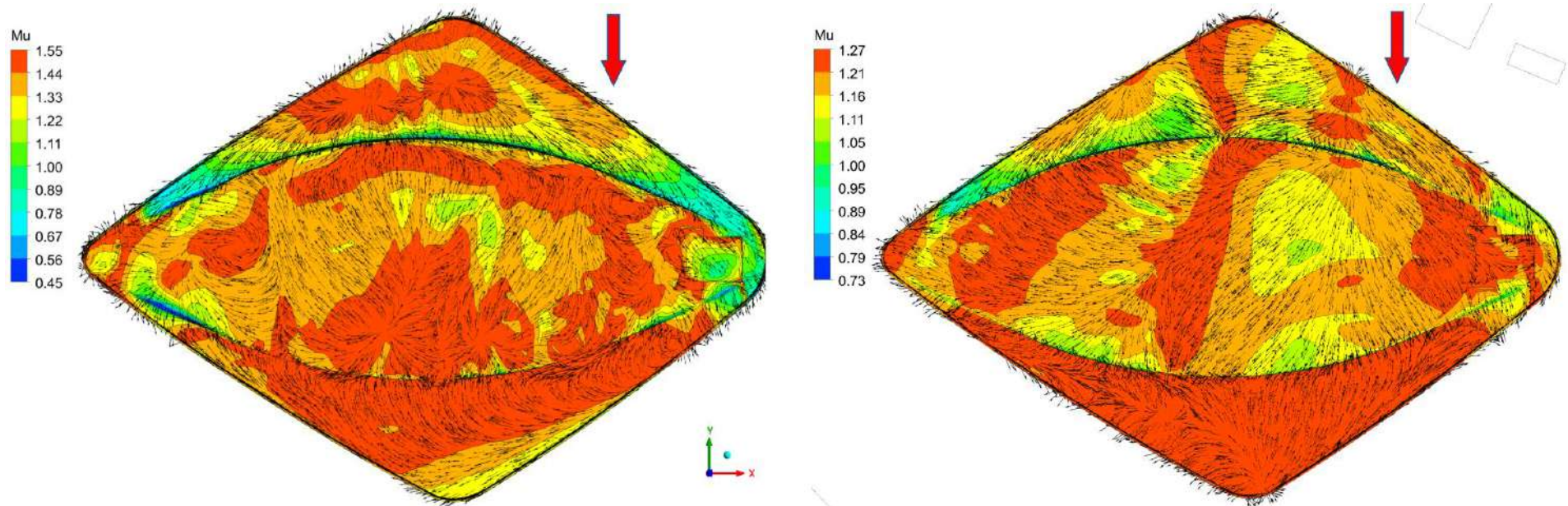


Рисунок 72 – Углы наклона нормалей поверхности объекта к поверхности земли

Дополнительно было проанализировано поведение ветрового потока над покрытиями «Волны», для чего использовались картины линий тока и векторных полей напряжения сдвига. Так, при моделировании без учета окружающей застройки на направлении  $0^\circ$  над кровлей был обнаружен вихрь, вызывающий снегоперенос на центральной части покрытия в противоположную обдуву сторону (рисунок 74, слева). Однако при моделировании с учетом окружающей застройки этот вихрь уже не наблюдался (рисунок 74, справа), и моделирование показало распределение снегоотложений вдоль тока ветра, согласно нормативным рекомендациям. Соответствующие картины напряжений сдвига и линий тока приведены на рисунке 73.

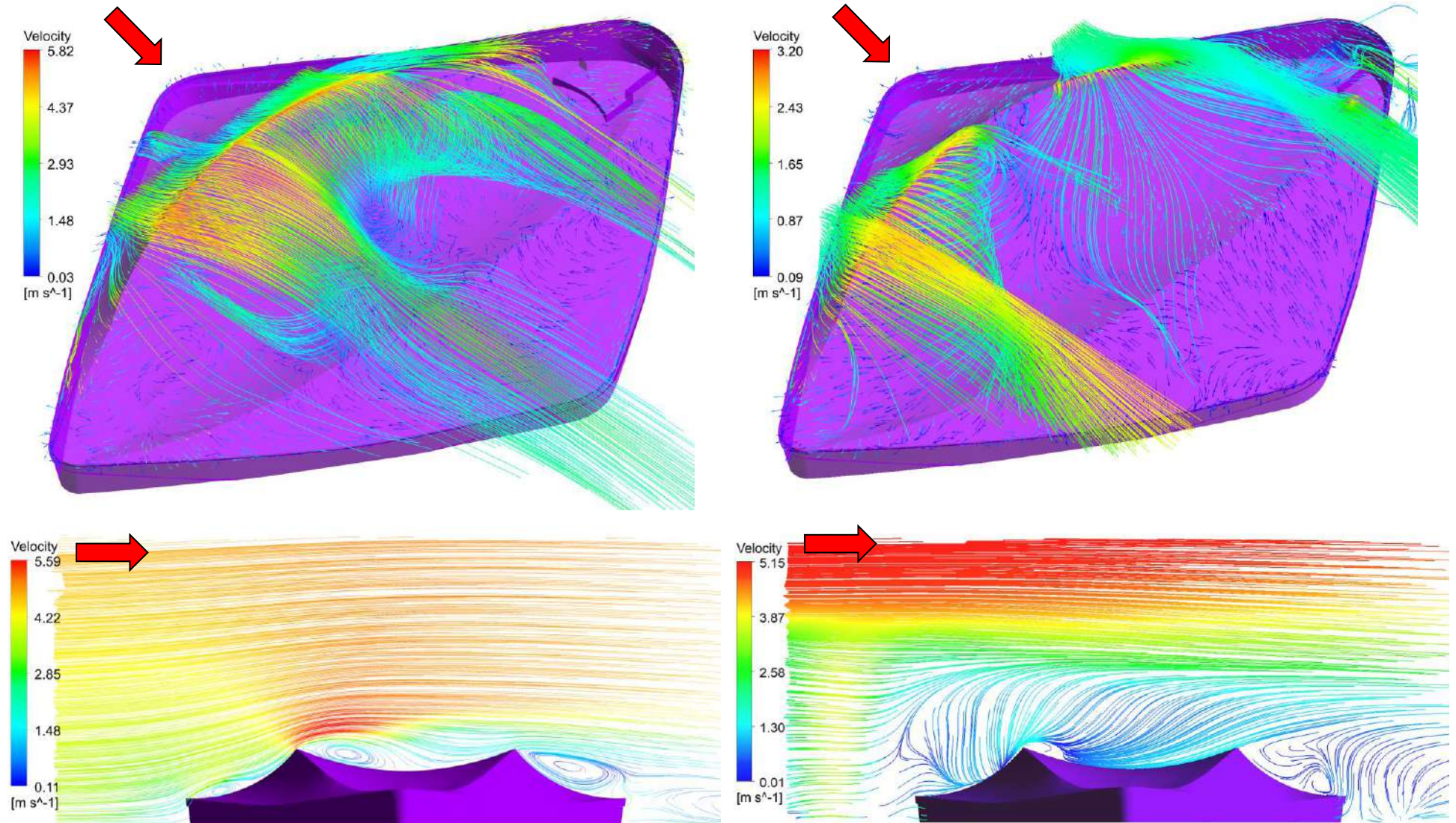


без учета окружающей застройки

с учетом окружающей застройки

Рисунок 73 – Векторное поле напряжений сдвига, нанесенное на смоделированный коэффициент формы  $\mu$ , для направления ветра  $0^\circ$





без учета окружающей застройки

с учетом окружающей застройки

Рисунок 74 – Линии тока ветра над объектом и векторное поле напряжений сдвига для направления ветра  $0^\circ$

В соответствии с методикой, результаты, полученные с помощью математического (численного) и физического (экспериментального) моделирования снегонакопления с учетом и без учета окружающей застройки, были обобщены и качественно использованы в инженерном анализе в сочетании с рекомендациями строительных норм и правил, что позволило получить окончательные карты расчетного коэффициента формы  $\mu$  для покрытия. Пример такой процедуры для направления ветра  $90^\circ$  приведен на рисунках 69 (физическое моделирование), 70 (математическое) и 71 (распределение расчетного коэффициента). 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 случаев проверки позволило не только получить расчетный коэффициент формы  $\mu$ , но и 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. Сравнение с физическим моделированием, проведенным для «Волны», также наглядно показало, что численное моделирование способно дать аналогичные и, следовательно, правдоподобные результаты, которые соответствуют природе процессов снегонакопления и снегопереноса.

#### **Выводы по главе 4**

1. С применением разработанной численной методики моделирования снегонакопления в нестационарной и стационарной постановке были проведены расчеты снеговой нагрузки на покрытия «Цеха №104», «Агоры» и «Волны».

2. Ограниченный набор частных картин распределения снегоотложений, полученных с помощью методики в нестационарной постановке для покрытия «Цеха №104», а также ресурсы, затраченные на их получение, показали, что применение этой методики на задачах реальной инженерной практики не оправдано. Хотя возможность исследовать локальные снегоотложения при частных случаях снегонакопления в некоторых случаях может представлять интерес, для моделирования расчетного коэффициента формы  $\mu$  методика на сегодняшний день не подходит.

3. Численное моделирование снеговой нагрузки, выполненное с применением методики в стационарной постановке для «Агоры» и «Волны», не только позволило откалибровать саму методику и продемонстрировать сходство получаемых с ее помощью результатов с результатами «классического» физического моделирования в аэродинамических трубах, но и исполнить свою основную задачу – определить неочевидные и опасные распределения коэффициента формы  $\mu$ , которые не могли быть получены лишь на основе рекомендаций строительных норм и правил любых стран мира.

## 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.

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 и реальных задач в практике расчетных исследований напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости большепролетных зданий и сооружений на значимых этапах их жизненного цикла.

6. Перспективой дальнейшей разработки темы является наукоемкая интеграция предложенных методик 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 ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абельс Г.Ф. Суточный ход температуры снега и определение зависимости между теплопроводностью снега и его плотностью / Г.Ф. Абельс //Метеорологический сборник. – 1893. – Т. 4. – С. 65.
2. Айзен А.М. К вероятностной оценке снеговой нагрузки / А.М. Айзен, Д.М. Ротштейн //Строительная механика и расчет сооружений. – 1981. – №. 5. – С. 7.
3. Алексеенко А.Г. Снеговые и ветровые нагрузки на арочные конструкции (на примере территории Якутии) : дис. / А.Г. Алексеенко – Дальневост. гос. техн. ун-т, 2005.
4. Афанасьева И.Н. Адаптивная методика численного моделирования трехмерных динамических задач строительной аэрогидроупругости: дис. / И.Н. Афанасьева – М: НИУ МГСУ. – 2014. — 200 с.
5. 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.
6. Белостоцкий А.М. Comparison of determination of snow loads for roofs in building codes of various countries / А.М. Белостоцкий, Н.А. Бритиков, О.С. Горячевский //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Т. 17. – №. 3. – С. 39-47.
7. Белостоцкий А.М. Critical review of modern numerical modelling of snow accumulation on roofs with arbitrary geometry / А.М. Белостоцкий, Н.А. Бритиков, О.С. Горячевский //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Т. 17. – №. 4. – С. 40-59.
8. Белостоцкий А.М. Critical review of physical modelling of snow accumulation on roofs with arbitrary geometry / А.М. Белостоцкий, О.С. Горячевский, Н.А.

Бритиков //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Т. 17. – №. 4. – С. 22-39.

9. Белостоцкий А.М. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. Учебное пособие. / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, И.Н. Афанасьева – М.: Издательство АСВ, 2017. - 720 с. - ISBN 978-5-4323-0217-5

10. Березин М.А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. / М.А. Березин, В.В. Катюшин – 2003.

11. Бритиков Н.А Numerical modelling of snow deposits and snow transport on long-span roofs for steady and unsteady flow / Н.А. Бритиков //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – Т. 18. – №. 4. – С. 23-38.

12. 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.

13. 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.

14. Бритиков Н.А. Численное моделирование снегоотложений и снегопереноса в задачах строительства: магистерская диссертация. / Н.А. Бритиков – М.: МИЭМ НИУ ВШЭ – 2018.

15. Булычев А.П. Временные нагрузки на несущие конструкции зданий торговли / А.П. Булычев //Строительная механика и расчет сооружений. – 1989. – №. 3. – С. 57-59.

16. Булычев А.П. Некоторые вопросы надежности строительных конструкций / А.П. Булычев //Труды ЦНИИСК: Нагрузки и надежность строительных конструкций. – №. 21. – С. 4-13.

17. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. / М. Ван-Дайк – М.: «Мир». – 1986. – 184 с.

18. Васильчук Ю.К. Основы изотопной геокриологии и гляциологии. / Ю.К. Васильчук, В.М. Котляков – 2000.

19. Вахрин И.С. Деформационные характеристики оттаивающих грунтов естественного сложения / И.С. Вахрин, Г.П. Кузьмин, В.В. Спектр //Успехи современного естествознания. – 2020. – №. 8. – С. 37-42.
20. Генсиоровский Ю.В. Определение снеговых нагрузок на сооружения при проведении инженерных изысканий: разработка региональных нормативных документов по снеговым нагрузкам (на примере Сахалинской области) / Ю.В. Генсиоровский, Н.А. Казаков, С.П. Жируев, В.И. Окопный, В.А. Лобкина //Геориск. – 2011. – №. 3. – С. 14.
21. Генсиоровский Ю.В. Периодичность метелевых зим на острове Сахалин и проблемы снегозаносимости урбанизированных территорий / Ю.В. Генсиоровский //Геориск. – 2010. – №. 4. – С. 32-36.
22. Гордеев В.Н. Нагрузки и воздействие на здания и сооружения. / В.Н. Гордеев – 2006.
23. Грудев И.Д. Определение нормативных и расчетных значений снеговых нагрузок / И.Д. Грудев //Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – №. 4. – С. 10-12.
24. Де Кервен М.Р. О метаморфизме снега / М.Р. Де Кервен // «Лед и снег. Свойства, процессы, использование». – М.: «Мир». – 1966.
25. Дмитриев Д.С. Уточненный динамический анализ напряженно-деформированного состояния трехмерной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмических воздействиях: дис. / Д.С. Дмитриев – М: РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева. – 2020. — 158 с.
26. Дюнин А.К. Механика метелей. / А.К. Дюнин – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР. – 1963. – 378 с.
27. Дюнин А.К. Экспериментальные исследования снежных метелей при высоких скоростях ветра / А.К. Дюнин, Б.А. Анфилофьев, М.Г. Истрапович, Я.Д. Квон // Снег и лавины Сахалина. – Л.: Гидрометеиздат. – 1975. – С. 56–67.
28. Жукова Н.К. Снеговые нагрузки на сложнопрофильных покрытиях промышленных зданий. В кн.: Проектирование и строительство промышленных



зданий и сооружений. / Н.К. Жукова //Тр. Уральского Промстройинипроекта. – М.: 1975. – №31. – С. 91-112.

29. Заварина М.В. К расчету гололедных нагрузок / М.В. Заварина //Труды ГГО. – 1970. – №. 265. – С. 21-29.

30. Заварина М.В. Районирование территории СССР по снеговой нагрузке на горизонтальную поверхность / М.В. Заварина, В.И. Липовская //Метеорология и гидрология. – 1973. – №. 7. – С. 69.

31. Замалеев М.М. Техникоэкономическое обоснование новых технологий утилизации снега на ТЭЦ / М.М. Замалеев //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2016. – №. 11-12. – С. 3-9.

32. Кондратьева А.С. Увеличение плотности снега под влиянием сжимающей нагрузки / А.С. Кондратьева, И.В. Крагельский, А.А. Шахов //Физико-механические свойства снега и их использование в аэродромном и дорожном строительстве.-М. – 1945. – С. 5-9.

33. Копанев И.Д. О состоянии и перспективах исследований по прикладной климатологии. / И.Д. Копанев //Труды Ордена Трудового Красного Знамени Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 1976. – Т. 349. – С. 3.

34. Корнилов, Т.А. Повышение надежности конструкций зданий и сооружений в условиях экстремальных атмосферных нагрузок и воздействий Севера: дис. / Т.А. Корнилов – Якутск: СВФУ им. М.К. Аммосова. – 2010. — 392 с.

35. Кузьмин П.П. К методике определения плотности влажного снега / П.П. Кузьмин //Метеорология и гидрология. – 1952. – №. 10. – С. 17-21.

36. Ледовской И.В. Проблемы теории снеговых нагрузок на сооружения: дис. / И.В. Ледовской – СПб: СПбГАСУ. – 2008. — 325 с.

37. Ледовской И.В. Снеговая нагрузка на покрытие отапливаемого здания / И.В. Ледовской //Вестник гражданских инженеров. – 2008. – №. 2. – С. 31-37.

38. Ледовской И.В. Снеговые нагрузки на многоволновые покрытия здания из оболочек положительной гауссовой кривизны / И.В. Ледовской, Ю.М. Калужинский //Металлические конструкции и испытания сооружений. – Л.: 1986. – С. 102-108.

39. Ледовской И.В. Снеговые нагрузки на покрытия зданий в г. Ленинграде / И.В. Ледовской, Ю.М. Калужинский // Вопросы надежности строительных конструкций. Куйбышев. 1985. С. 61.
40. Ледовской И.В. О характере снеговых нагрузок на некоторых видах пространственных покрытий / И.В. Ледовской, Ю.М. Калужинский, В.А. Павлов, А.В. Рошин, Д.Г. Никифоров // Изв. вузов. стр-во и архитектура. – 1985. – № 1. – С. 5-10.
41. Ледовской И.В. Снеговые нагрузки на покрытия неотапливаемых зданий / И.В. Ледовской, А.А. Котов // Исследования по механике строительных конструкций и материалов. – СПб. – 1993. – С. 125-128.
42. Ледовской И.В. К вопросу о снижении снеговой нагрузки на покрытие здания за счет таяния снега / И.В. Ледовской, В.А. Павлов // Надежность и качество строительных конструкций // Куйбышев: изд-во КГУ. – 1982. – С. 137-142.
43. Липовская В.И. Кратковременные снеговые нагрузки / В.И. Липовская // Труды ГГО им. Воейкова. – 1971. – №. 283.
44. Лобкина В.А. Ущерб от снеговых нагрузок в Российской Федерации. Причины и последствия / В.А. Лобкина // Геориск. – 2012. – №. 1. – С. 50.
45. Лобкина В.А. Геоэкологические проблемы участков, занятых снежными полигонами в городах (на примере г. Южно-Сахалинск) / В.А. Лобкина, Ю.В. Генсиоровский, Н.Н. Ухова // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2016. – №. 6. – С. 510-520.
46. Лобкина В.А. Система дистанционного мониторинга снеговой нагрузки на кровле зданий / В.А. Лобкина, И.А. Кононов, А.А. Потапов // Лед и Снег. – 2016. – Т. 56. – №. 2. – С. 246-252.
47. Лобкина В.А. Снеговые нагрузки и районирование территории острова Сахалин по весу снегового покрова: дис. / В.А. Лобкина – Хабаровск: ДВГИ ДВО РАН. – 2013. — 137 с.
48. Методическое пособие «Математическое (численное) моделирование ветровых нагрузок и воздействий» (к СП 20.13330.2016). – М.: ФАУ ФЦС Минстроя России. – 2020.

49. Научно-технический отчет по теме НИР «Трехмерное математическое моделирование ветровых потоков в зоне цехов-корпусов (для оценки их влияния на аэродинамику и снеговую нагрузку Цеха №107) объекта: «Центр строительства крупнотоннажных морских сооружений (ЦСКМС)». – М.: ФГБОУ ВО НИУ МГСУ. – 2020.

50. Научно-технический отчет по теме НИР «Разработка рекомендаций по назначению ветровых и снеговых нагрузок на конструкции Главного корпуса («АГОРА») и Амфитеатра объекта «Подмосковный образовательный молодежный центр «Мастерская управления «Сенеж», планируемый к строительству по адресу: Московская область, городской округ Солнечногорск, г. Солнечногорск, ул. Прибрежная». – М.: ФГБОУ ВО НИУ МГСУ. – 2020.

51. Научно-технический отчет по Этапу 1 «Комплексные аэродинамические исследования по Объекту, на основе экспериментального (физического) и численного (математического) моделирования» в рамках НИР «Научно-техническое сопровождение проектирования, включая комплексные аэродинамические исследования, расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, динамики, прочности и устойчивости несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях основных и особых (аварийных) нагрузок и воздействий и сопоставительный анализ результатов альтернативных расчетов, для Объекта – «Серфинг-парк «Волна», расположенного по адресу: г. Москва, Мневниковская пойма, з/у № 11» – М.: ФГБОУ ВО НИУ МГСУ. – 2022.

52. Никифоров А.Я. Методика исследования снеговых нагрузок на большепролетных покрытиях сводчатого очертания в условиях Крайнего Севера / А.Я. Никифоров, Я.М. Самсонов, Т.А. Корнилов //Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго-и ресурсосбережения. – 2016. – С. 358-363.

53. Отставнов В.А. Снеговые нагрузки на покрытие над трибунами / В.А. Отставнов //Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2002. – №. 3. – С. 40.

54. Отставнов В.А. Снеговые нагрузки на покрытие / В.А. Отставнов, И.В. Лебедева //Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – №. 3. – С. 18-21.
55. Отставнов В.А. Возможности снижения снеговых нагрузок с плоских покрытий / В.А. Отставнов, Л.С. Розенберг //Пром. стр-во. – 1966. – №. 12. – С. 28-31.
56. Отставнов В.А. Усовершенствование методики определения веса снежного покрова / В.А. Отставнов, Л.С. Розенберг //Методика определения нагрузок на здания и сооружения. Под ред. Н.С. Стрелецкого. – 1963. – С. 64-73.
57. Отчет о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе по теме: «Математическое (численное) моделирование для определения расчетных снеговых нагрузок на большепролетные сооружения». – М.: ФГБОУ ВО НИУ МГСУ. – 2021.
58. Попов Н.А. Воздействие ветровых и снеговых нагрузок на большепролетные покрытия / Н.А. Попов, И.В. Лебедева, Д.С. Богачев, М.М. Березин //Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №. 12. – С. 71-76.
59. Райзер В.Д. Климатические нагрузки и воздействия для расчета конструкций покрытия Старого Гостиного Двора. / В.Д. Райзер – 1997.
60. Ржаницын А.Р. Вероятностный метод расчета конструкций, воспринимающих снеговую нагрузку / А.Р. Ржаницын, Ю.Д. Сухов, А.П. Булычев //Строительная механика и расчет сооружений. – 1974. – №. 4. – С. 40-43.
61. Рихтер Г.Д. Использование снега и снежного покрова в целях борьбы за высокий урожай / Г.Д. Рихтер //Роль снежного покрова в земледелии. – М.: Изд-во АН СССР. – 1953. – С. 6-61.
62. Рихтер Г.Д. Проблемы изучения снега и снежного покрова / Г.Д. Рихтер //Снег и талые воды, их изучение и использование: сб. ст. по материалам Межведомств. совещ. по вопросам изучения снега, 1954. – 1956. – С. 5.
63. Ротштейн Д.М. О сочетании случайных процессов ветровых и снеговых нагрузок на строительные конструкции / Д.М. Ротштейн //Редакционный совет. – С. 197.

64. Свод правил: СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция. СНиП 2.01.07-85: нормативно-технический материал: утв. Приказом Минстроя России № 891/пр от 03.12.2016. – М.: Стандартинформ, 2017. – 95 с.
65. Свод правил: СП 131.13330.2020. СНиП 23-01-99\*. Строительная климатология: нормативно-технический материал: утв. Приказом Минстроя России № 859/пр от 24.12.2020. – М.: Стандартинформ, 2020. – 151 с.
66. Стандарт организации «Численное моделирование ветровых и снеговых воздействий» (проект). – М.: ФГБОУ ВО НИУ МГСУ. – 2023.
67. Строкатов Б.П. Закономерности формирования снеговых нагрузок на плоских покрытиях и учет их особенностей при расчете металлического каркаса производственных зданий. / Б.П. Строкатов – 1984.
68. Ушаков Б.А. Атлас аэродинамических характеристик профилей крыльев, испытанных в трубе Т-1. / Б.А. Ушаков – Рипол Классик, 2013.
69. Филиппов В.В. Снеговые нагрузки на покрытиях зданий в условиях Севера. / В.В. Филиппов, А.Т. Копылов, Т.А. Корнилов – 2000.
70. Anderson, R.S. 1991. Wind modification and bed response during saltation of sand in air. / R.S. Anderson, P.K. Haff //Acta Mech., Supplementum 1. Aeolian Grain Transport. I: Mechanics. – 1991. – С. 21-52
71. Anno, Y. Froude number paradoxes in the modeling of a snowdrift / Y. Anno //Cold Regions Science and Technology. – 1985. – Т. 10. – №. 2. – С. 191-192.
72. Anno, Y. Modelling a snowdrift by means of activated clay particles / Y. Anno //Annals of Glaciology. – 1985. – Т. 6. – С. 48-52.
73. Anno, Y. Requirements for modeling of a snowdrift / Y. Anno //Cold regions science and technology. – 1984. – Т. 8. – №. 3. – С. 241-252.
74. ASCE 7-22 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.
75. ASCE. Wind tunnel testing for buildings and other structures. – American Society of Civil Engineers, 2012.

76. Ayres, P. Otkritie Arena: Design of the new Spartak Moscow Stadium / P. Ayres, T. Webster //Stahlbau. – 2014. – T. 83. – №. 6. – C. 400-405.
77. Bagnold, R.A. The Transport of Sand. / R.A. Bagnold //The Geographical Journal. – 1937 – T. 89. – №5. – C. 409-438
78. Bagnold, R.A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. / R.A. Bagnold //Methuen & Co.: William Morrow, New York. – 1941.
79. Beyers, J.H.M. Outdoors modelling of snowdrift at SANAE IV Research Station, Antarctica / J.H.M. Beyers, T.M. Harms //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2003. – T. 91. – №. 4. – C. 551-569.
80. Beyers, J.H.M. Numerical simulation of snow drift around an elevated structure / J.H.M. Beyers, P.A. Sundsbø, T.M. Harms //Proceedings of the 5th International Conference on Snow Engineering, Davos, Switzerland, 5–8 July. – 2004. – C. 185-191.
81. Beyers, J.H.M. Numerical simulation of three-dimensional transient snow drifting around a cube. / J.H.M. Beyers, P.A. Sundsbø, T.M. Harms //J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 2004. – T. 92. – C. 725–747
82. Beyers, J.H.M. Modeling transient snowdrift development around complex three-dimensional structures. / J.H.M. Beyers, B. Waechter. //J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 2008. – T. 96. – C. 1603–1615.
83. Bintanja, R. Modification of the wind speed profile caused by snowdrift: results from observations / R. Bintanja //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2001. – T. 127. – №. 577. – C. 2417-2434.
84. Brooks, A. Comparison of Physical Snow Accumulation Simulation Techniques / A. Brooks et al. //Proceedings of the International Conference on Snow Engineering (ICSE 2016), Nantes, France. – 2016.
85. Brooks, A. Rapid Assessment of Snow Drifting Conditions Using Physical Model Simulations / A. Brooks et al. //Cold Regions Engineering 2015. – 2015. – C. 310-321.
86. Williams, C.J. Field Observations of Wind Deflection Fins to Control Snow Accumulations on Roofs / C.J. Williams //Proc. 1st Int. Conf. on Snow Eng. – 1986. – C. 307-314.

87. Chiba, T. Accuracy of snow depth measurements on roofs measured with photogrammetry / T. Chiba, T.K. Thiis //Proceedings of the International Conference on Snow Engineering (ICSE 2016), Nantes, France. – 2016.
88. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads.
89. Finney, E.A. Snow control on the highway. / E.A. Finney //Bulletin. Michigan Engineering Experiment Station (East Lansing). – 1934. – №57.
90. Finney, E.A. Snow drift control by highway design. / E.A. Finney //Bulletin. Michigan Engineering Experiment Station (East Lansing). – 1939. – №86.
91. Flaga, A. Wind tunnel model tests of snow precipitation and redistribution on rooftops, terraces and in the vicinity of high-rise buildings / A. Flaga et al. //Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2019. – T. 19. – C. 1295-1303.
92. Gamble, S.L. Finite area element snow loading prediction-applications and advancements. / S.L. Gamble, W.W. Kochanski, P.A. Irwin //J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 1992. – T. 42. – №1. – C. 1537–1548.
93. Irwin, P.A. Application of snow simulation model tests to planning and design / P.A. Irwin //Proc. Eastern Snow Conference, Vol. 28, 40th annual Meeting. – 1983. – T. 28. – C. 118-130.
94. Irwin, P.A. Lifetime experiences in wind engineering / P.A. Irwin //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2020. – T. 205. – C. 104272.
95. Irwin, P.A. Wind and snow considerations for wide span enclosures / P.A. Irwin, F.M. Hochstenbach, S.L. Gamble //Widespan Roof Structures. – 2000. – C. 62.
96. Irwin, P.A. Prevention of excess snow accumulation due to roof mounted solar collectors / P.A. Irwin, C.J. Williams //Rept. for Ministry of Municipal Affairs and Housing of Ontario. – 1981.
97. ISO 4355:2013 – Bases for design of structures — Determination of snow loads on roofs, IDT
98. Isyumov, N. Wind tunnel model tests of snow drifting on a two-level flat roof / N. Isyumov, M. Mikitiuk //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1990. – T. 36. – C. 893-904.

99. Isyumov, N. Wind tunnel modeling of snow accumulations on large-area roofs / N. Isyumov, M. Mikitiuk //Proc., 2nd Int. Conf. On Snow Engineering. – 1992. – C. 181-193.
100. Isyumov, N. An Approach to the Prediction of Snow Loads, PhD. Thesis. / N. Isyumov //University of Western Ontario, London, Canada. – 1971.
101. Isyumov, N. A Probabilistic Approach to the Prediction of Snow Loads. / N. Isyumov, A.G. Davenport //Canadian Journal of Civil Engineering. – 1974. – T. 1. – C. 28-49.
102. Iversen, J.D. Drifting-snow similitude—transport-rate and roughness modeling / J.D. Iversen //Journal of glaciology. – 1980. – T. 26. – №. 94. – C. 393-403.
103. Iversen, J.D. Eolian erosion of the Martian surface, part 1: Erosion rate similitude / J.D. Iversen et al. //Icarus. – 1975. – T. 26. – №. 3. – C. 321-331.
104. Iversen, J.D. Small-scale modelling of snowdrift phenomena. / J.D. Iversen //Proc., Int. Workshop on Wind Tunnel Modelling Criteria in Civil Engineering Applications. – 1982. – C. 522–545.
105. Iversen, J.D. Drifting snow similitude. / J.D. Iversen //Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers. – 1979. – T. 105. – №HY6. – C. 737-753.
106. Jansson, M. Über die Wärmeleitungsfähigkeit des Schnees. / M. Jansson – 1901.
107. JSCE – Standard Specifications for Steel and Composite Structures
108. Kang, L. A new method for predicting snowdrift on flat roofs. / L. Kang, X. Zhou, M. Gu //Proceedings of the 8th International Conference on Snow Engineering, Nantes, France. – 2016. – C. 137–14.
109. Kind, R.J. Snowdrifting: a review of modelling methods / R.J. Kind //Cold Regions Science and Technology. – 1986. – T. 12. – №. 3. – C. 217-228.
110. Kind, R.J. Saltation flow measurements relating to modeling of snowdrifting / R.J. Kind, S.B. Murray //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1982. – T. 10. – №. 1. – C. 89-102.



111. Kind, R.J. Mechanics of aeolian transport of snow and sand. / R.J. Kind //J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 1990. – T. 36. – C. 855–866
112. Kobayashi, D. Studies of Snow Transport in Low-Level Drifting Snow. / D. Kobayashi //Institute of Low Temperature Science, Sapporo, Japan, Series A. – 1973.
113. Kumar, G. Flow and deposition measurement of foam beads in a closed recirculating wind tunnel for snowdrift modelling / G. Kumar, A. Gairola, A. Vaid //Flow Measurement and Instrumentation. – 2020. – T. 72. – C. 101687.
114. Liston, G.E. A two-dimensional computational model of turbulent atmospheric surface flows with drifting snow. / G.E. Liston, R.L. Brown, J.D. Dent //Ann. Glaciol. – 1993. – T. 18. – C. 281–286.
115. O'Rourke, M. Snow Drifting Transport Rates from Water Flume Simulation. / M. O'Rourke, A. DeGaetano, J.D. Tokarczyk //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2004. – №92. – C. 1245-1264.
116. Ma, W. Field measurement and numerical simulation of snow deposition on an embankment in snowdrift / W. Ma et al. //Wind and Structures. – 2021. – T. 32. – №. 5. – C. 453-469.
117. Ma, W. An empirical model of snowdrift based on field measurements: Profiles of the snow particle size and mass flux / W. Ma, F. Li, X. Zhou //Cold Regions Science and Technology. – 2021. – C. 103312.
118. Ma, W. Field measurement and numerical simulation of snow deposition on an embankment in snowdrift. / W. Ma, F. Li, Y. Sun, J. Li, X. Zhou //Wind and Structures. – 2021. – T.32. – №5. – C.453-469.
119. Mellor, M. Engineering Properties of Snow. / M. Mellor //J. Glaciol. – 1997. – T. 19. – №8. – C. 15–66.
120. Menter, F.R. Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows. / F.R. Menter //AIAA Paper. – 1993. – 93-2906.
121. Menter, F.R. Development of a Generalized  $k-\omega$  Two-Equation Turbulence Model. / F.R. Menter, R. Lechner, A. Matyushenko //New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics. – 2020. – T. 12. – C. 101-109.

122. Moore, I. A numerical model of blowing snow around an Antarctic building. / I. Moore, S.D. Mobbs, D.B. Ingham, J.C. King //Ann. Glaciol. – 1994. – T. 20. – №1. – C. 341–346.
123. Naaim, M. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models / M. Naaim, F. Naaim-Bouvet, H. Martinez //Annals of glaciology. – 1998. – T. 26. – C. 191-196.
124. National Building Code of India, 2016
125. National Research Council of Canada. National building code of Canada 2015. – National Research Council Canada, 2015.
126. Odar, F. Scale factors for simulation of drifting snow. / F. Odar //Journal of the Engineering Mechanics Division, American Society of Civil Engineers. – 1962. – T. 88. – №EM2. – C. 1- 16.
127. Odar, F. Simulation of drifting snow. / F. Odar //U.S. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Research Report 174. – 1965.
128. Okaze, T. Wind tunnel investigation of drifting snow development in a boundary layer / T. Okaze et al. //Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. – 2012. – T. 104. – C. 532-539.
129. Okaze, T. CFD prediction of snowdrift in a building array. / T. Okaze, S. Kato, Y. Tominaga, A. Mochida //Proceedings of the 8th International Conference on Snow Engineering, Nantes, France. – 2016. – C. 26–29.
130. Okaze, T. CFD prediction of snowdrift around a cube using two transport equations for drifting snow density. / T. Okaze, A. Mochida, Y. Tominaga, Y. Ito, H. Yoshino //Proceedings of 5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina, USA. – 2010.
131. Peterka, J.A. Roof design snow loads by wind tunnel test and analysis / J.A. Peterka, W.S. Esterday //Structures 2004: Building on the Past, Securing the Future. – 2004. – C. 1-9.
132. Peterka, J.A. On the relaxation of saltation length as a modeling criterion for particulate transport by wind / J.A. Peterka, R.L. Petersen //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1990. – T. 36. – C. 867-876.

133. Pomeroy, J.W. Saltation of Snow. / J.W. Pomeroy, D.M. Gray //Wat. Res. Research. – 1990. – T. 26. – №7. – C. 1583-1594.
134. Pomeroy, J.W. Modelling Snow Transport, Snowmelt and Meltwater Infiltration in Open, Northern Regions. / J.W. Pomeroy, D.M. Gray, R.J. Granger – 1989. – C. 8-22.
135. Qiang, S. A novel snow transport model for analytically investigating effects of wind exposure on flat roof snow load due to saltation / S. Qiang et al. //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2021. – T. 210. – C. 104505
136. Qiang, S. A study of snow drifting on a flat roof during snowfall based on simulations in a cryogenic wind tunnel / S. Qiang et al. //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2019. – T. 188. – C. 269-279.
137. Strom, G.H. Wind tunnel studies with scale model simulated snow. / G.H. Strom, R.W. Gerdel //International Association of Scientific Hydrology. – 1961.
138. Sanchez-Gonzalez, A. Learning to simulate complex physics with graph networks. / A. Sanchez-Gonzalez, J. Godwin, T. Pfaff, R. Ying, J. Leskovec, P. Battaglia //International Conference on Machine Learning – 2020. – C. 8459-8468.
139. Sanpaolesi, L. Scientific support activity in the field of structural stability of civil engineering works: Snow loads / L. Sanpaolesi et al. //Final Report Phase I. Brussels: Commission of the European Communities. DGIII-D3. – 1998.
140. Sanpaolesi, L. Scientific support activity in the field of structural stability of civil engineering works: Snow loads / L. Sanpaolesi et al. //Final Report Phase II. Brussels: Commission of the European Communities. DGIII-D3. – 1998.
141. Sato, T. Field test of a new snow-particle counter (SPC) system / T. Sato et al. //Annals of Glaciology. – 1993. – T. 18. – C. 149-154.
142. Sekine, A. The numerical simulation of snowdrift around a building. / A. Sekine, M. Shimura, A. Maruoka, H. Hirano //Int. J. Comput. Fluid. – 1999. – T.12. – C. 249-255.
143. Shih, T.-H. A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. / T.-H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu //Computers & Fluids. – 1995. – T. 24. – №3. – C. 227-238.

144. Smedley, D.J. Snowdrifting simulation around Davis station workshop, Antarctica / D.J. Smedley, K.C.S. Kwok, D.H. Kim //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1993. – T. 50. – C. 153-162.
145. Standard B. Eurocode 1: Actions on structures. – 2010.
146. Sun, X. Numerical simulation of snowdrift on a membrane roof and the mechanical performance under snow loads / X. Sun, R. He, Y. Wu //Cold Regions Science and Technology. – 2018. – T. 150. – C. 15-24
147. Sundsbø, P.A. Numerical simulations of wind deflection fins to control snow accumulation in building steps. / P.A. Sundsbø //J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 1998. – T. 74–76. – C. 543–552.
148. Tabler, R.D. Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design. / R.D. Tabler – 2003. – №. NCHRP Project 20-7 (147).
149. Takeuchi, M. Snow-collection mechanisms and the capacities of snow fences / M. Takeuchi //Annals of glaciology. – 1989. – T. 13. – C. 248-251.
150. Takeuchi, M. Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport. / M. Takeuchi //J. Glaciol. – 1980. – T. 26. – №94. – C. 481-492.
151. Tanji, S. Development of a Snowdrift Model with the Lattice Boltzmann Method. / S. Tanji, M. Inatsu, T. Okaze – 2021. – <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-342607/v1>
152. Thiis, T.K. A comparison of numerical simulations and full-scale measurements of snowdrifts around buildings. / T.K. Thiis //Wind Struct. – 2000. – T. 3. – №2. – C. 73-81.
153. Thiis, T.K. Large scale studies of development of snowdrifts around buildings. / T.K. Thiis //J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 2003. T. 91. – №6. – C. 829–839.
154. Thiis, T.K. Model for snow loading on gable roofs. / T.K. Thiis, M. O'Rourke //J. Struct. Eng. – 2015. – T. 141. – №12. – 04015051.
155. Thiis, T.K. Measurements and numerical simulations of development of snow drifts of curved roofs. / T.K. Thiis, J.F. Ramberg //Proceedings of the 6th International Conference on Snow Engineering, Whistler, Canada, (June 1–5). – 2008.

156. Tominaga, Y. Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives. / Y. Tominaga //Cold Reg. Sci. Technol. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.05.004> – 2017.
157. Tominaga, Y. CFD prediction of snowdrift around a cubic building model. / Y. Tominaga, A. Mochida, H. Yoshino, T. Shida, T. Okaze //Proceedings of the Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006), Yokohama, Japan. – 2006. – C. 941–944.
158. Tominaga, Y. CFD modeling of snowdrift around a building: An overview of models and evaluation of a new approach. / Y. Tominaga, T. Okaze, A. Mochida //Building and Environment. – 2011. – T. 46. – №4. – C. 899-910.
159. Tominaga, Y. CFD simulation of drift snow loads for an isolated gable-roof building. / Y. Tominaga, T. Okaze, A. Mochida //Proceedings of the 8th International Conference on Snow Engineering, Nantes, France. – 2016. – C. 208–214.
160. Uematsu, T. Three-dimensional numerical simulation of snowdrift. / T. Uematsu, T. Nakata, K. Takeuchi, Y. Arisawa, Y. Kaneda //Cold Reg. Sci. Technol. – 1991. – T. 20. – C. 65–73.
161. Wang, J. Modeling snowdrift on roofs using Immersed Boundary Method and wind tunnel test / J. Wang et al. //Building and environment. – 2019. – T. 160. – C. 106208.
162. Wang, J. Wind tunnel test of wind-induced snowdrift on stepped flat roofs during snowfall / J. Wang et al. //Natural Hazards. – 2020. – T. 104. – №. 1. – C. 731-752.
163. Yan, K. Close Shot Photogrammetry for Measuring Wind-Drifted Snow Distribution on Stepped Flat Roofs / K. Yan, T. Cheng //2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. – 2008. – T. 1. – C. 332-335.
164. Yosida, Z. Physical Studies on Deposited Snow. I.; Thermal Properties / Z. Yosida et al. //Contributions from the Institute of Low Temperature Science. – 1955. – T. 7. – C. 19-74.

165. Younger, A. Simulate and test different tent arrangements in windy and snowy conditions. / A. Younger – 2017.
166. Zhang, G. Numerical simulations of snowdrift characteristics on multi-span arch roofs / G. Zhang et al. //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2021. – T. 212. – C. 104593.
167. Zhou, X. RANS CFD simulations can be successfully used for simulating snowdrift on roofs in a long period of snowstorm / X. Zhou et al. //Building simulation. – Tsinghua University Press, 2020. – T. 13. – C. 1157-1163.
168. Zhou, X. Wind tunnel test on responses of a lightweight roof structure under joint action of wind and snow loads / X. Zhou et al. //Cold Regions Science and Technology. – 2016. – T. 132. – C. 19-32.
169. Zhou, X. Wind tunnel test of snow loads on a stepped flat roof using different granular materials / X. Zhou, J. Hu, M. Gu //Natural hazards. – 2014. – T. 74. – №. 3. – C. 1629-1648
170. Zhou, X. Coupling a snowmelt model with a snowdrift model for the study of snow distribution on roofs / X. Zhou, Y. Zhang, M. Gu //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2018. – T. 182. – C. 235-251
171. Zhou, X. Numerical simulation and wind tunnel test for redistribution of snow on a flat roof. / X. Zhou, L. Kang, M. Gu, L. Qiu, J. Hu //J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 2016a. – T. 153. – C. 92–105