

УДК 624.042.42

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СНЕГОВЫХ НАГРУЗОК НА ПОВЕРХНОСТИ КУБА И ОБРАЗОВАНИЯ СНЕЖНЫХ ЗАНОСОВ ВОКРУГ КУБА

А. Г. Олѣх

Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов и производств, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: agoleh@g.bstu.by

Реферат

В статье рассматривается моделирование снеговых нагрузок на здания и сооружения, а также анализ процессов переноса снега воздушными потоками. Рассмотрены механизмы формирования снеговой нагрузки и факторы, влияющие на её величину и распределение: количество выпадающих осадков, форма покрытия здания, перенос снега воздушными массами (способен значительно изменять месторасположение и количество снега на различных поверхностях) и теплотехнические характеристики кровли. Изложены полевые наблюдения за распределением снега, проведённые на заранее выбранных площадках. Описаны особенности выбранного участка, расположенного в равнинной местности с учетом специфики климатических условий и ветровых режимов. Приведены технические параметры весоизмерительной установки, включающие использование датчиков и автоматизированной системы записи данных. Подробно описана методика проведения полевых измерений, включая автоматический сбор данных о запасе воды в снеге, температуре и скорости ветра. Результаты полевых исследований демонстрируют детальное изменение снежного покрова в зимний период. Подготовка точных исходных данных – важнейший этап, который закладывает основу для успешного численного анализа. Ошибки или неточности могут привести к искажениям и неверным прогнозам в моделируемых сценариях. На основе данных, полученных весоизмерительной установкой и датчиками, определяющими скорость и направление ветра, было выполнено численное моделирование распределения снега на поверхности куба и образования снежных заносов вокруг куба на поверхности земли. В статье отображено сравнение результатов полевых наблюдений за кубом и результатов, полученных при помощи математического моделирования на основе метода предложенного М. Нааим. Актуальность данной темы обусловлена необходимостью более точного определения снеговых нагрузок, что способствует повышению надежности строительных конструкций и инфраструктуры.

Ключевые слова: снеговая нагрузка, распределение, моделирование, гидродинамика.

ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF SNOW LOADS ON THE SURFACE OF THE CUBE AND THE FORMATION OF SNOW DRIFT AROUND THE CUBE

A. G. Aliokh

Abstract

This article examines the modeling of snow loads on buildings and structures, as well as the analysis of snow transport by air currents. It examines the mechanisms of snow load formation and the factors influencing its magnitude and distribution, including precipitation amount, building roof shape, snow transport by air masses (which can significantly alter the location and amount of snow on various surfaces), and roof thermal performance. Field observations of snow distribution, conducted at pre-selected sites, are presented. The features of the selected site, located in flat terrain, are described, taking into account the specific climatic conditions and wind patterns. The technical parameters of the weighing rig, including the use of sensors and an automated data recording system, are presented. The methodology for conducting field measurements is described in detail, including automatic data collection on snow water content, temperature, and wind speed. The results of the field studies demonstrate detailed changes in snow cover during the winter. Preparing accurate initial data is a crucial step, laying the foundation for successful numerical analysis. Errors or inaccuracies can lead to distortions and incorrect predictions in simulated scenarios. Using data obtained from a weighing system and sensors measuring wind speed and direction, a numerical simulation of snow distribution on the surface of a snow cube and the formation of snow drifts around the cube on the ground surface was performed. This article compares the results of field observations of the cube with those obtained through mathematical modeling based on the method proposed by M. Naaim. The relevance of this topic stems from the need to more accurately determine snow loads, which contributes to improving the reliability of building structures and infrastructure.

Keywords: snow load, distribution, simulation, hydrodynamics.

Введение

Снеговая нагрузка на кровлю формируется под воздействием ряда факторов.

1. Количество выпадающих в зимнее время твердых осадков – значение веса снегового покрова (веса воды) на квадратный метр поверхности земли. Зависит от высоты местности над уровнем моря.

2. Форма покрытия и распределения снеговых отложений по поверхности кровельного покрытия. Является причиной ссыпания снега с наклонных поверхностей (в отличие от сдувания, вызывается действием силы тяжести, а не ветра). Вероятность сползания слоя снега зависит от шероховатости поверхности, уклона покрытия и теплопроводности кровли (подтаивший на поверхности покрытия снег играет роль своеобразной смазки), а также от состояния самого снежного покрова, которое в значительной степени определяется температурой воздуха во время его залегания.

3. Сдувание снега с покрытия (ветровая защищенность или перенос снега, приводящий к неравномерным отложениям по поверхности по-

крытия и к сносу некоторой части выпавшего снега с покрытия). Зависит от конфигурации и шероховатости поверхности покрытия, направления и скорости ветра, а также от состояния снежного покрова, которое определяется температурой воздуха во время его залегания.

4. Теплотехнические характеристики кровли и влияние подтаивания снега.

5. Качество снега (температура, диаметр частиц, сила сцепления частиц).

В нормативных документах для определения значения снеговых нагрузок на покрытия зданий и сооружений предусмотрены схемы распределения снеговой нагрузки. Однако их количество ограничено. Поэтому для определения снеговых нагрузок, распределенных на покрытии, форма или конфигурация которого отсутствует среди схем, предложенных в нормативных документах, рекомендуется проводить модельные испытания [1]. Наиболее эффективным в настоящее время методом прогнозирования является проведение экспериментов в аэродинамической трубе с модельным снегом [2, 3]. Однако

до сих пор существуют неопределенности относительно законов подобию между реальным и аэродинамическим снегом, включая их физические свойства [4–8]. В последние годы, благодаря развитию компьютерных технологий и широкому распространению программного обеспечения для вычислительной гидродинамики – CFD (от англ. Control Fluid Dynamic), численное моделирование воздушного потока с помощью CFD становится всё более популярным [9]. Метод вычислительной гидродинамики имеет преимущество перед экспериментальными методами моделирования в том, что параметры модели являются контролируемыми без ограничений [10].

1 Полевые наблюдения за распределением снега на поверхности куба и образования снежных заносов вокруг куба на поверхности земли

Для верификации результата численного моделирования снеготеноса методами вычислительной гидродинамики были проведены полевые наблюдения за распределением снега на поверхности куба и образования снежных заносов вокруг куба на поверхности земли.

1.1 Характеристики места проведения полевых наблюдений

Выбор места определялся как наиболее подходящий из доступных. Местность – равнинная, в большой удаленности от крупных рек и озер. В северном и западном направлениях ограничена деревьями высотой от пяти до восьми метров, в восточном – деревьями высотой до пяти метров и кустарниками, ограничивающими наметание снега с пахотных земель, со стороны южного направления – одноэтажной постройкой хозяйственно-бытового назначения.

Остальные характеристики участка:

- высота над уровнем моря – 142,26 м [11];
- преобладающее направление ветра за декабрь – февраль – западный ветер [12];

- среднее количество (сумма) осадков за ноябрь – март – 185 мм [12];
- максимальная суточная высота снежного покрова за зиму на последний день декады – 45 см [12];
- дата появления первого снега (самая ранняя) – 13 октября 1973 г. [13];
- дата появления первого снега (средняя) – 21 ноября [13];
- дата последнего схода снега (средняя) – 30 марта [13];
- дата последнего схода снега (самая поздняя) – 28 апреля 1984 г. [13].

Измерения проводились на двух площадках расположенных в непосредственной близости друг от друга.

Площадка № 1 (см. рисунок 1) находится в месте защищенном от ветра со всех сторон с установленной весоизмерительной платформой со следующими техническими характеристиками.

Максимальная нагрузка – 200 кг.

Минимальная статическая нагрузка – 0 кг.

Чувствительность весовой платформы – $\pm 0,005$ кг.

Пределы допускаемой погрешности, кг:

- от 0 до 10 000·v включительно: $\pm 0,35$ v;
- свыше 10 000·v: $\pm 0,70$ v,

где v – значение поверочного интервала, кг ($v = E_{\max}/6n_{\max}$);

$E_{\max}$ – максимальная нагрузка;

$n_{\max}$ – максимальное число поверочных интервалов (3000).

Рабочий диапазон температур – от минус 35 °C до 80 °C.

Степень защиты – IP68.

Для определения температуры наружного воздуха установлен термометр сопротивления платиновый на высоте 1,1 м. Для определения скорости ветра на высоте 1,6 м установлен анемометр чашечный.



Рисунок 1 – Площадка № 1. Установка для измерения массы снега

Площадка № 2 (см. рисунок 2) представляет собой ровную устойчивую поверхность размером 12 м × 18 м, не защищенную от ветра с восточного и юго-восточного направлений. За опорную поверхность принимается граница в нижней части снежного покрова или снеготеноса – поверхность земли.

На площадке был установлен куб (размер – 1,03 м × 1,03 м × 1,03 м). Для исключения скольжения снега по поверхности куба он был изготовлен из материала с нескользящей поверхностью. Для измерения высоты снега, скопившегося на поверхности земли возле куба (снежных заносов) и на кубе использовалось метрологическое пове-

ренное измерительное оборудование: линейки (цена деления – 1 мм), штангенциркуль (цена деления – 0,1 мм).

Измерения проводились вручную, после снегопадов. Погрешность измерений: 0,05 мм – при определении высоты скопившегося снега на поверхности куба, 5 мм – при определении высоты снеготеноса на поверхности земли.

Рядом с Площадкой № 2 (см. рисунок 2) на высоте 1,2 м над поверхностью земли установлен датчик для измерения скорости и направления ветра. Полученные показания скорости осреднены за 10-ти минутный период, непосредственно предшествующий сроку наблюдения.

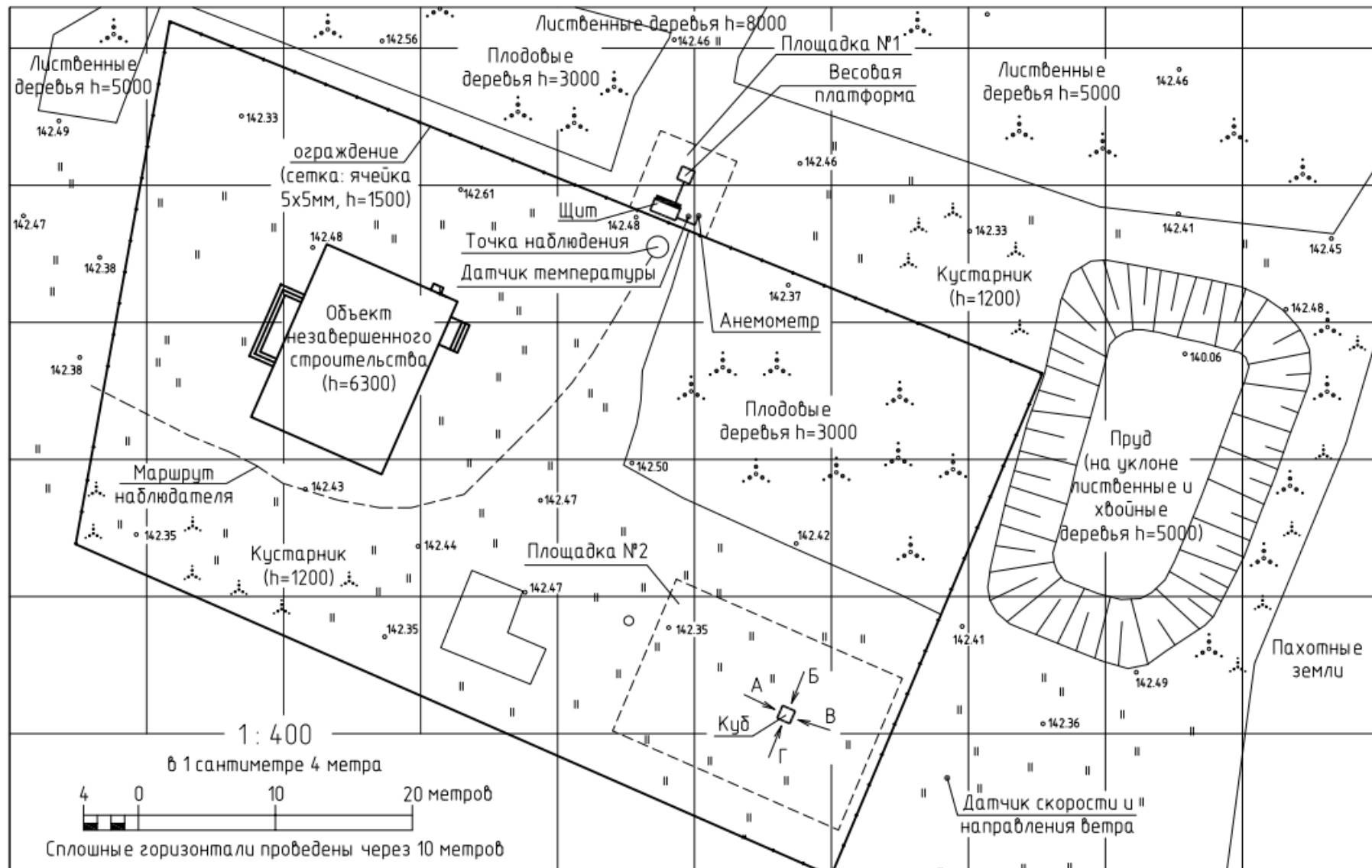


Рисунок 2 – Схема наблюдательного участка

1.2 Обработка полученных результатов

Измерения массы снега, температуры и скорости ветра на Площадке № 1 проводились автоматически каждые 5 мин. Результаты наблюдений были усреднены и сведены в таблицу 1.

На рисунке 5а представлена схема высоты снежного покрова, на рисунках 6а–8а – наблюдаемое распределение высоты снежного покрова на момент наблюдения.

2. Построение карты распределения снега с помощью метода вычислительной гидродинамики

В качестве исходных данных примем результаты полевых наблюдений приведенные в таблице 1. Разделим процесс моделирования на два снегопада.

Первый снегопад:

1) высота снежного покрова – 45 мм;

2) снеговая нагрузка – 48,76 Па;

3) скорость ветра – отсутствует (объект наблюдения защищен от ветра);

4) плотность снега (средняя) – 90 кг/м³;

5) температура (средняя) – минус 4,42 °С;

6) продолжительность снегопада – 70 ч 40 мин;

7) интенсивность – 0,07 мм/ч;

Второй снегопад:

1) высота снежного покрова – 60 мм (свежевыпавшего – 15 мм);

2) снеговая нагрузка – 39,24 Па;

3) скорость ветра: средняя и самая продолжительная – 1,1 м/с, (кратковременные порывы ветра до 1,8 м/с);

4) направление ветра – совпадает с направлением вида «В» (Площадка № 2) в соответствии с рисунком 2;

5) плотность снега (средняя) – 149,5 кг/м³;

6) температура (средняя за 06.01.2026) – минус 3,8 °С;

7) продолжительность снегопада – 8 ч 15 мин;

8) интенсивность – 0,49 мм/ч.

Т. к. при переносе ветром кристаллы меняют свою форму и размер, поэтому было решено в качестве снега принять гранулы диаметром 1,2 мм.

Таблица 1 – Результаты наблюдений за снежным покровом

Дата	Высота снежного покрова (мм)	Снеговая нагрузка (Па)	Скорость ветра (среднее и максимальное значение) на высоте 1,2 м около Площадки № 2	Направление ветра на высоте 1,2 м над поверхностью земли	Плотность снежного покрова (кг/м ³)	Температура воздуха на высоте 1,1 м над поверхностью земли (среднее значение)	Относительная влажность (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли ¹	Количество всех наблюдающихся облаков в период с 09:00 по 18:00 ¹	Продолжительность снегопада	Интенсивность снегопада (мм/ч)
31.12.2025	–	8,83	– ²	ВСВ ²		–12,9	73	45 %	5 ч 15 мин	0,17
01.01.2026	31	15,7	– ²	Ю ²	51,61	–7,8	85	98 %	с 12:40_01.01.2026 по 02:25_04.01.2026 непрерывный слабый снег 0,06 мм/ч	
02.01.2026	–	28,45	– ²	ЮЗ ²		–0,1	83	100 %		
03.01.2026	43	44,34	– ²	ЮЗ ²	105,12	–0,8	82	88 %		
04.01.2026	–	47,28	– ²	ЮЗ ²		–1,6	66	55 %		
05.01.2026	45	48,76	– ²	ЮЗ ²	110,44	–3,3	73	40 %	3 ч 40 мин	0,04
06.01.2026	–	88	1,1 (1,8)	В		–3,8	85	100 %	8 ч 15 мин	0,49
07.01.2026	60	88	– ²	С ²	149,50	–5,2	84	100 %	осадки не наблюдались	

– измерения высоты снежного покрова не проводились.

¹ Информация о величине относительная влажность (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли и количестве всех наблюдающихся облаков была получена из архивных данных близлежащей метеорологической станции.

² Информация о преобладающем направлении ветра (румбы) на высоте 10–12 метров над земной поверхностью, осредненное за 10-минутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдения была получена из архивных данных близлежащей метеорологической станции. Площадка № 2 в этих направлениях защищена от ветра.

Задачу построения схемы распределения снега будем решать основываясь на работе [14], которую в 1998 году опубликовал французский ученый М. Naaim. Эта работа стала основой для разработки современных моделей снегопереноса и снегоотложения [15–19]. Для моделирования массообмена между воздухом и снегом Naaim предложил «эрозийную» модель, в которой процесс массообмена зависит от характеристик турбулентности основного потока, от критической скорости потока (скорость потока, соответствующая началу переноса частиц снега) и локальной концентрации снега.

Одной из основополагающих работ, лёгшей в основу подавляющего большинства теоретических наработок по вопросу механики процессов золотого переноса, является труд «Физика выдуваемого песка и пустынных дюн» Р. А. Багнольда [20]. В нем заложены основы научного исследования динамики движения песка по преимущественно равнинной местности (как песок поднимается, транспортируется и накапливается на плоской поверхности), а также золотого переноса и аэродинамики воздушных потоков, когда они перемещаются по изогнутым поверхностям скоплений песка. Подчеркивается

также возможность воспроизведения этих природных явлений в контролируемых условиях лаборатории. Используя аэродинамическую трубу, построенную самим ученым, Р. А. Багнольд стремился получить более глубокое понимание физики, управляющей взаимодействием между воздушными потоками и песчинками, и наоборот. Помимо изучения песка и его динамики в контексте ветра, Р. А. Багнольд также выделяет различия и сходства между движением песка в воздухе и воде и сравнивает песок и сухой зернистый снег, отмечая параллели в их движении.

Снег, как и песок, участвует в эоловых процессах, но песчинки, в отличие от снежинок, не обладают свойством когезии (внутрифазного сцепления частиц). Однако, снег, который выпал при очень низких температурах, скажем -15°C , и в совершенно безветренную погоду представляет собой крайний случай отсутствия внутреннего сцепления частиц [21].

Перенос снега начинается, когда аэродинамическое поверхностное напряжение сдвига достаточно велико, чтобы преодолеть инерцию и прочность сцепления частиц в поверхностном слое снежного покрова. Затем частицы начинают перекачиваться и скользить по поверхности снега (ползучесть) и в конечном итоге, если доступной энергии вязкого сдвига достаточно, преодолевают силу тяжести и выбрасываются из снежного покрова, прыгая по поверхности (сальтация). Частицы в области сальтации сталкиваются со снежным покровом, который затем может сместить больше частиц с поверхности. Если турбулентная энергия поля потока достаточно велика, то эти частицы могут подниматься

далее вверх турбулентными вихрями (взвесью). Длительное осаждение и взвесь частиц снега расходуют турбулентную энергию жидкости-носителя, что означает, что этот процесс является самоограничивающимся, т. е. при идеальных условиях могут существовать стационарные концентрации. Кроме того, на поверхности снежного покрова может также происходить локальное размывание снега в результате набегающих потоков [22–24].

Таким образом, дрейфующий снег возникает в результате вызванного ветром движения частиц снега, оседающих на землю. Такое движение возможно, когда сила сопротивления, создаваемая воздушным потоком, превышает противодействующие эффекты когезионного сцепления между частицами, веса частиц и поверхностного трения. Этот порог аэродинамического уноса был выведен Р. А. Багнольдом и называется порогом текучести. Ученый также определил порог воздействия, который применяется при более низком поверхностном напряжении сдвига, когда частицы уже дрейфуют. Достаточно большое количество дрейфующих частиц извлекает достаточный импульс из воздушного потока, чтобы заметно снизить его скорость и снизить поверхностное напряжение сдвига ниже порогового значения для жидкости. Столкновения частиц на поверхности в этом случае помогут поддерживать дрейф, приводя в движение поверхностные частицы, облегчая перенос их более медленным воздушным потоком при меньшем поверхностном напряжении сдвига. Р. А. Багнольд также классифицировал эолово дрейфующее движение частиц на три подпроцесса: ползучесть, сальтацию и взвесь (рисунки 3).

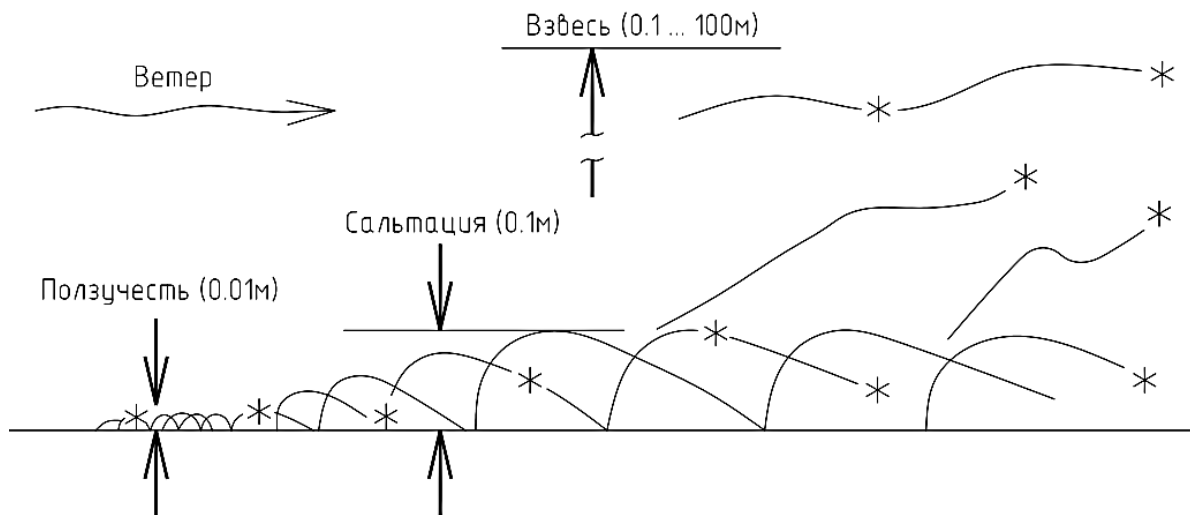


Рисунок 3 – Перенос снежных частиц ветром

Перенос снежных частиц ветром включает в себя три способа движения:

1) *ползучесть* – это явление, при котором зерна движутся за счет перекачивания, скольжения или сползания по поверхности тех частиц, которые слишком тяжелы, чтобы их мог поднять преобладающий ветер и на высоте ниже около 0,01 м, когезия которых с поверхностью сильнее силы ветра. Мигрирующие снежные волны или дюны образуются из ползущего снега, и эти дюны перемещаются вниз по ветру со скоростью, пропорциональной скорости ветра. Было определено, что при ветре со средней скоростью 8 м/с наблюдалось движение снежных волн со скоростью 5 м/ч, которые переносили около 45 кг снега в час на метр ширины по ветру. Скорость снежных волн составляет от 1,2 до 6 м/ч, длина волн варьируется от 3 до 15 м, а высота – от 0,05 до 0,2 м. Ползущие частицы обычно составляют очень малую часть общего переноса снега, за исключением очень низких скоростей ветра;

2) *сальтация* – перемещение частиц снега «скачками» или «прыжками» по поверхности снега. Слой снега, в котором происходит сальтация, не является слоем частиц однородной формы: это смесь связанных между собой кристаллов, метаморфизован-

ных под воздействием сальтационных частиц и переноса пара при транспортировке. Траектория движения частиц сальтации зависит от скорости ветра, размера частиц и состояния поверхности. Они движутся по траектории с резким, почти вертикальным подъемом и плоским, почти горизонтальным спуском. Масса материала, которую поток способен перенести в слое сальтации, определяется по формуле (2.1). Высота области сальтации составляет от 0,01 м до 0,1 м;

3) *взвешенный слой* (турбулентная диффузия, суспензия) – движение частиц снега во взвешенном потоке со средней горизонтальной скоростью, близкой к скорости движущегося воздуха. Источником взвешенных частиц является сальтационный слой, образуется из мелких наносов и включает краткосрочные (диаметр 20–70 μm , частицы возвращаются в слой сальтации), и долгосрочные (диаметр $< 20 \mu\text{m}$, материал полностью уносится потоком взвеси). Взвешенная частица становится взвешенной, когда сила сопротивления, действующая на нее со стороны движущегося вверх воздуха, превышает силу гравитации [25, 26].

Особый интерес для этого исследования представляет двусторонне связанный режим сальтации. Р. А. Багнольд [20] предложил

формулу описывающую массу материала, который ветер способен перенести в слое сальтации. Она имеет вид

$$q = C \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \cdot \frac{\rho}{g} \cdot u_*^3, \quad (2.1)$$

где q – масса песка, который перемещается по полосе единичной ширины мимо фиксированной точки в единицу времени по поверхности сыпучего песка и градиентом ветра, который его гонит;

C – безразмерная константа (эмпирический коэффициент имеет следующие значения: 1,5 для почти однородного песка, 1,8 для песка с естественной гранулометрией, например, для песка, который встречается в дюнах, 2,8 для песка с очень широким диапазоном размеров зерен);

ρ – плотность воздуха (г/см³);

g – ускорение свободного падения (см/с²);

d – референтный размер песчинки (диаметр зерен рассматриваемого песка);

D – равномерный размер песчинок использованный Р. А. Багнольдом при проведении экспериментов (250 мкм);

u_* – скорость трения (фактическая измеренная скорость перемещения песка), выражение для которой имеет вид

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}, \quad (2.2)$$

где τ – местное напряжение сдвига на стенке;

ρ – плотность воздуха.

$$q_{ero/dep} = \begin{cases} q_{ero} = A \cdot \rho \cdot (u_*^2 - u_{*t}^2), & \text{для } u_* > u_{*t} \\ q_{dep} = \rho_s \cdot f \cdot w_f \cdot \frac{u_{*t}^2 - u_*^2}{u_{*t}^2}, & \text{для } u_* \leq u_{*t} \end{cases}, \quad (2.4)$$

где $A \cdot \rho = 7 \cdot 10^{-4}$ – коэффициент пропорциональности, характеризует силу сцепления частиц снега

u_{*t} – предельная скорость трения

$$u_{*t} = A_1 \cdot \sqrt{\frac{\rho_i - \rho_a}{\rho_i} \cdot g \cdot d_s}, \quad \text{здесь, согласно [29]:}$$

$A_1 = 0,2$ – пороговый параметр;

ρ_i – плотность частиц снега;

ρ_a – плотность воздуха;

$$f_{sal/susp} = \begin{cases} f_{sal} = \frac{0.68}{g \cdot u_* \cdot \rho_p \cdot h_{sal}} \cdot u_{*t} \cdot (u_*^2 - u_{*t}^2), & \text{для } z \leq h_{sal} \\ f_{susp} = \eta(z_r) \cdot e^{-1.55 \cdot \left[(0.05628 \cdot u_*)^{-0.544} - z^{-0.544} \right]}, & \text{для } z > h_{sal} \end{cases}, \quad (2.5)$$

$u_p = C \cdot u_{*t} = (2.3 \dots 2.8) \cdot u_{*t}$ – средняя скорость частицы снега в области сальтации;

$$h_{sal} = \frac{1.6 \cdot u_*^2}{2 \cdot g} \quad \text{– средняя высота области сальтации;}$$

$\eta(z_r) = 0.8 \text{ кг/м}^3$ – эталонная массовая концентрация для суспензии [26];

Пристеночные сдвиговые напряжения являются очень важным параметром в процессе снеготранспорта и снеготложения. Частицы снега начинают двигаться, когда пристеночные сдвиговые напряжения τ на поверхности снега превышает его предельные значения τ_t , в противном случае частицы снега остаются неподвижными. В численном моделировании пристеночное сдвиговое напряжение τ заменяется скоростью трения u_* .

Теодор фон Кармана и Прандтль в начале 1930-х годов открыли логарифмический закон скорости потока [27], в соответствии с которым формула (2.2) принимает вид

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \frac{u(z) \cdot k}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \quad (2.3)$$

где $u(z)$ – средняя скорость (м/с) потока на высоте z ;

z – высота над поверхностью (м);

z_0 – аэродинамическая высота (м) шероховатости (высота слоя жесткости), то место, где $u(z)$ стремится к нулю (нуль профиля скорости);

k – постоянная фон Кармана равная 0,4 (определенная экспериментальным путем) [28].

Снежный поток уноса q_{ero} в упрощенном виде описывается в зависимости от скорости трения [14]. Поток осаднения q_{dep} рассчитывается как функция объемной доли f и скорость снегопада w_f . И определяется следующими выражениями:

g – ускорение свободного падения;

d_s – диаметр снежинок;

$w_f = 0,5 \text{ м/с}$ – скорость осаднения частиц снега;

ρ_s – плотность снега, кг/м³;

f – объемная доля снега представляет собой отношение концентрации частиц снега к плотности снега. Профиль концентрации частиц снега задается формулами, предложенными [30, 31]. Концентрация снега задается как постоянная в области сальтации и уменьшается экспоненциально с увеличением высоты к области взвешенного состояния.

После определенного периода времени снегопада Δt , глубина снежного покрова определяется с помощью следующей формулы:

$$h(t) = h_0 + \int_0^{\Delta t} \frac{q_{ero/dep}}{\rho_s} dt \quad (2.6)$$

h_0 – начальный снеговой покров, м;

На каждом временном шаге нестационарной задачи, сетка деформируется в соответствии с полученной новой высотой. На рисунке 4 изображена схема алгоритма расчета распределения снежного покрова.

Для результатов полевых наблюдений за кубом на Площадке № 2 построены карты распределения снега используя метод вычислительной гидродинамики, результаты численного моделирования представлены на рисунках 56–86.

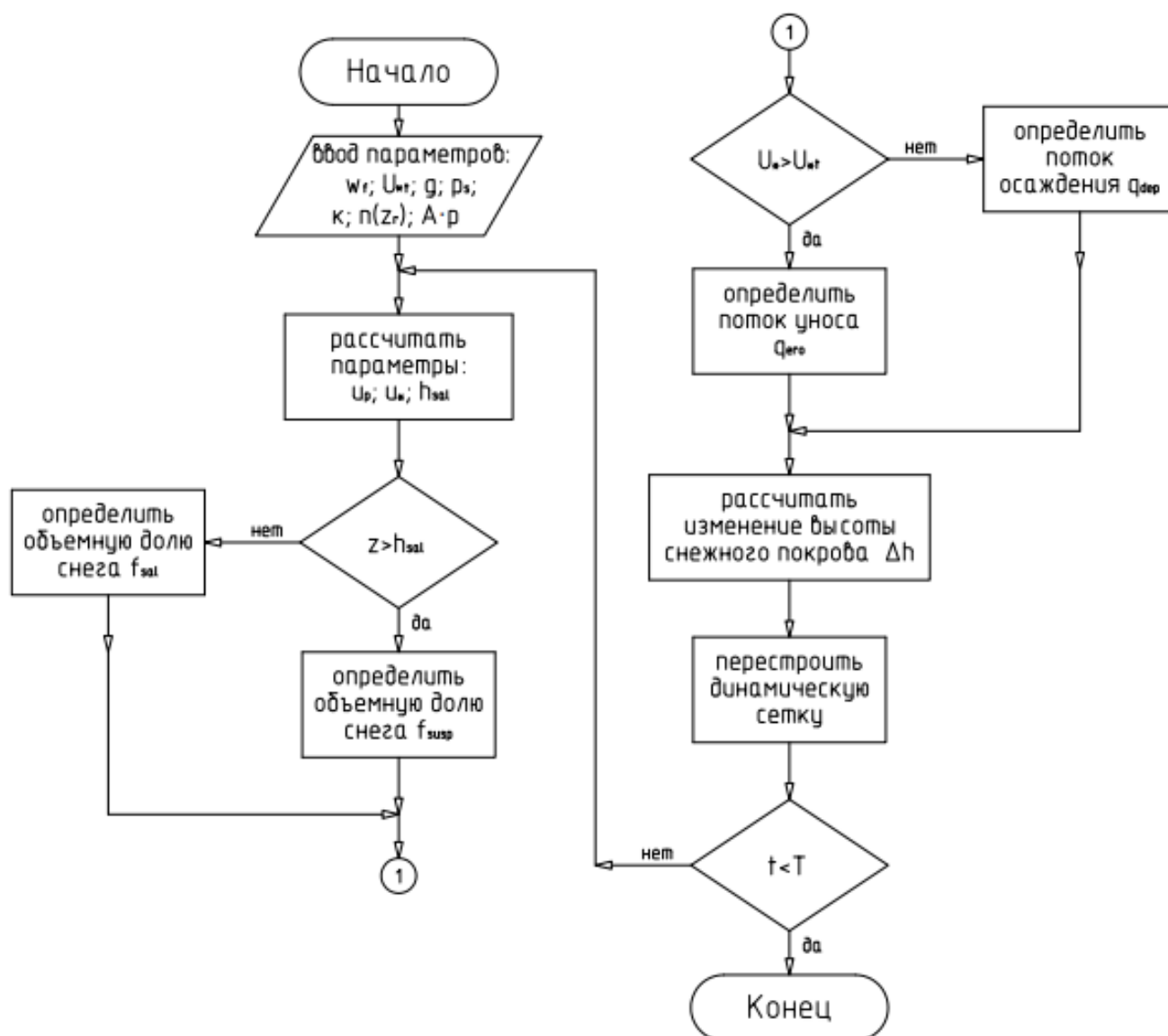
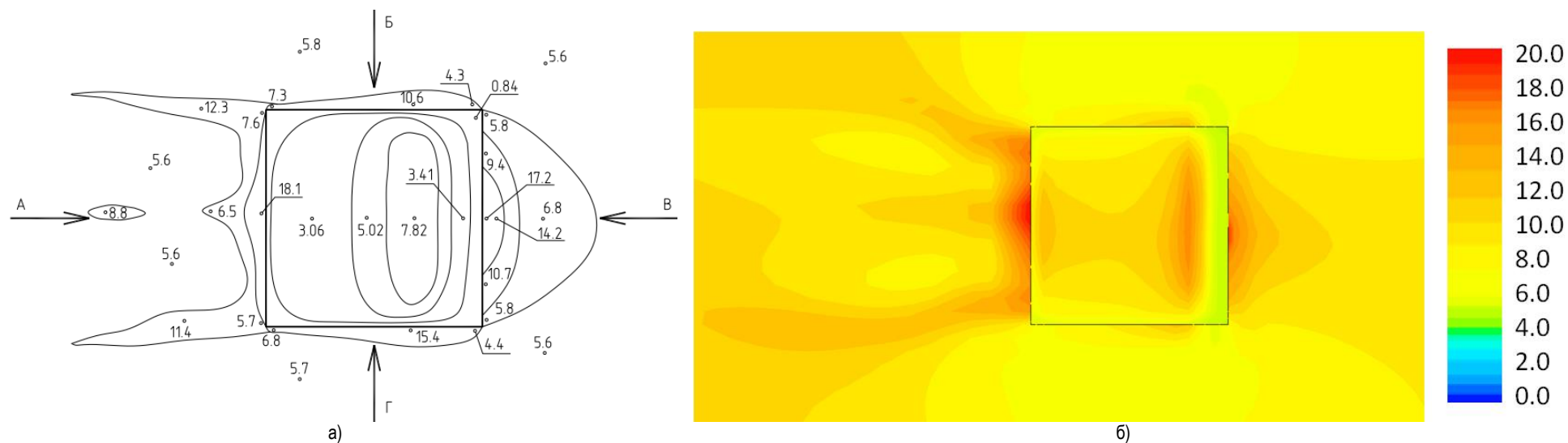
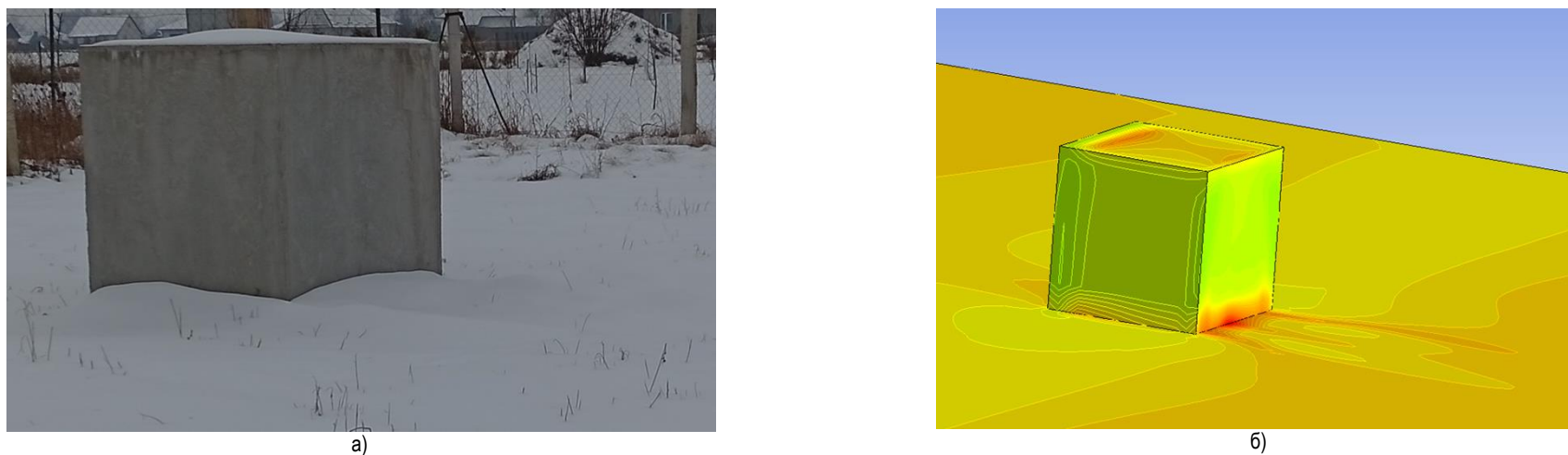


Рисунок 4 – Схема алгоритма расчета распределения снежного покрова



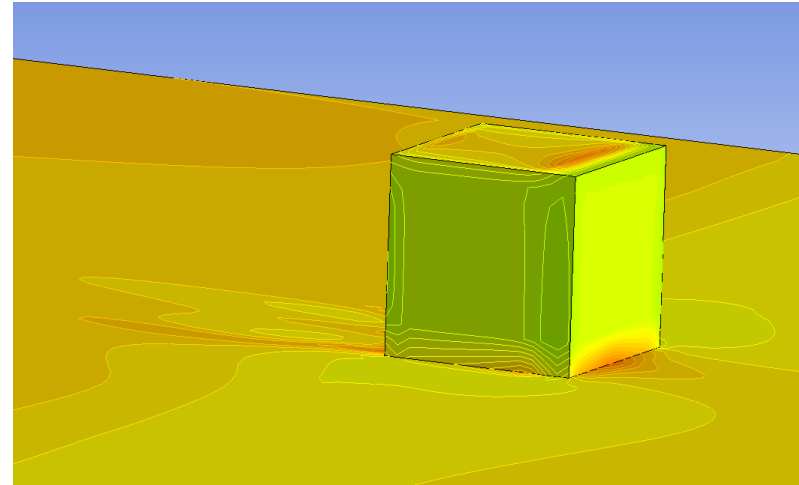
Схемы высоты снежного покрова (см): а) полевые наблюдения, б) результаты моделирования
Рисунок 5 – Площадка № 2. Куб. Направление ветра справа – налево



а) полевые наблюдения (фотография площадки), б) результаты моделирования
Рисунок 6 – Площадка № 2. Куб. Вид Б и вид А в соответствии с рисунком 2



а)



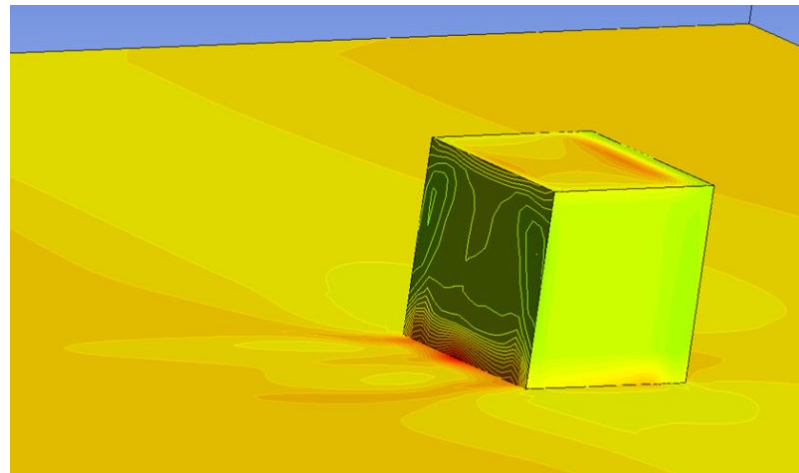
б)

а) полевые наблюдения (фотография площадки), б) результаты моделирования

Рисунок 7 – Площадка № 2. Куб. Вид Г и вид В в соответствии с рисунком 2



а)



б)

а) полевые наблюдения (фотография площадки), б) результаты моделирования

Рисунок 8 – Площадка № 2. Куб. Вид А и вид Г в соответствии с рисунком 2

В результате численного моделирования (рисунки 5–8) видно сходство по закону распределения снега на поверхности куба и на поверхности земли (сформировавшиеся снежные заносы вокруг куба). Однако степень точности занижена, это связано с рядом причин. Форма снежинок: в математической модели указана как гранула диаметром 1,5 мм, а в действительности снежинки почти всегда имеют шестиугольную (гексагональную) форму, что обусловлено структурой молекул воды. Форма снежинки зависит от температуры и влажности при которых она росла. Коэффициент, характеризующий силу сцепления частиц снега, был принят в соответствии с рекомендациями автора математической модели М. Naaim – 7·10⁻⁴ (коэффициент зависит от температуры, влажности и плотности, однако, исследований по этому вопросу не проводилось, и кривые зависимости, по которым можно было бы определить точное значение, также отсутствуют). Не учтена интенсивность сублимации (зависит от скорости ветра, суммарной радиации, температуры воздуха и относительной влажности), но учитывая условия, в которых проводились наблюдения (по данным таблицы 1: высокий процент облачности и влажности, отсутствие/низкая скорость ветра), процессом перехода из твердого состояния в газообразное минуя жидкую фазу, можно пренебречь. В математической модели также не учтено уплотняющее действие, которое оказывает ветер на выпавший снег. Но в целом карты распределения снега между полевыми наблюдениями и математическим моделированием удовлетворительны.

Заключение

Проведен сравнительный анализ результатов полевых наблюдений и численного моделирования распределения снеговых нагрузок на поверхности куба и образования снежных заносов вокруг куба на поверхности земли, на основании которого можно сделать следующие выводы.

При проверке достоверности численного моделирования было выявлено сходство в закономерностях распределения снега. Однако степень точности моделирования оказалась несколько заниженной, что объясняется рядом факторов. Основными причинами являются упрощения в описание формы снежинок, влияние уплотняющего действия ветра, что потенциально может влиять на реальную картину распределения снега. В целом, несмотря на ряд упрощений, карта распределения снега, полученная моделированием, хорошо согласуется с полевыми наблюдениями, что говорит о достаточной надежности и применимости метода для оценки снеговых нагрузок.

Использование методов CFD позволяет значительно расширить понимание механизмов формирования снеговых заносов и распределения снежных отложений.

Моделирование процессов накопления снега в различных временных и пространственных масштабах остается сложной задачей, и существующие модели во многом нуждаются в доработке.

Список цитированных источников

- Олех, А. Г. Особенности определения снеговых нагрузок на строительные конструкции = Features of determining snow loads on building structures / А. Г. Олех // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – № 2 (137). – С. 35–41. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-137-2-35-41.
- Mitsuhashi, H. Snowdrifting in building and wind tunnel experiment using model snow / H. Mitsuhashi // Journal of the Japanese Society of Snow and Ice. – 2003. – Vol. 65. – P. 287–295.
- Shuji, S. Wind Tunnel on effect of roof wind pressure of buildings on shaping roof snow accumulations / S. Shuji, A. B. E. Osamu, J. O. H. Osamu // Journal of Structural and Construction Engineering. – 2009. – Vol. 74. – P. 451–458.
- Oikawa, S. Study of wind tunnel similarity on snowdrift around buildings / S. Oikawa, T. Tomabechi, T. Ishihara // Nagare. – 2007. – Vol. 26. – P. 319–324.
- Kind, R. J. Snow Drifting / R. J. Kind // Handbook of Snow. Principles. Processes / Management and Use ; [ed.] D. M. Gray. – Oxford : Pergamon Press, 1981. – P. 338–359.
- Iversen, J. D. Drifting-snow similitude-transport-r-rate and roughness modeling / J. D. Iversen // Journal of Glaciology. – 1980. – Vol. 94. – P. 393–403.
- Irwin, P. A. Application of Snow Simulation Model Tests to Planning and Design / P. A. Irwin, C. J. Williams // Proceedings of the Eastern Snow Conference, 28, 40th Annual Meeting. – Toronto : Eastern Snow Conference, 1983. – P. 118–130.
- Peterka, J. A. On the relaxation of saltation length as a modeling criteria for particulate transport by wind / J. A. Peterka, R. L. Petersen // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1990. – Vol. 36. – P. 867–876.
- Nara, R. Numerical simulation of snowdrift development in non-equilibrium flow fields around buildings / R. Nara, C. Groth, M. E. Biancolini // Fluids. – 2025. – Vol. 10, iss. 4. – Art. 75. – P. 1–21. – URL: <https://www.mdpi.com/2311-5521/10/4/75> (дата обращения: 08.04.2026).
- A review on the CFD analysis of urban microclimate / Y. Toparlar, B. Blocken, B. Maiheu, G. J. F. van Heijst // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 80. – P. 1613–1640. – DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.248.
- Топографические карты. Беларусь. Бесплатный интерактивный веб-сервис : [сайт]. – Минск, 2026. – URL: <https://ru-ru.topographic-map.com> (дата обращения 25.04.2026).
- Строительная климатология : СНБ 2.04.02-2000, Изменение № 1. – Минск : Минстройархитектуры, 2007. – 33 с.
- Тур, В. В. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Поведение исследований изменения климатических воздействий на строительные конструкции в Республике Беларусь с целью внесения изменений в действующие ТНПА» (заключительный) / В. В. Тур, С. С. Дереченик, О. П. Мешик [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2015. – 229 с.
- Naaim, M. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models / M. Naaim, F. Naaim-Bouvet, H. Martinez // Annals of Glaciology. – 1998. – Vol. 26. – P. 191–196.
- Thiis, T. K. Large scale studies of development of snowdrifts around buildings / T. K. Thiis // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2003. – Vol. 91, № 6. – P. 829–839.
- Thiis, T. K. Measurements and Numerical Simulation of Development of Snow Drifts on Curved Roofs / T. K. Thiis, J. F. Ramberg // Snow Engineering VI : Proceedings of the 6th International Conference, Whistler, BC, Canada, 2008. – [S. l.] : ECI, 2008. – P. 1–5.
- Thiis, T. K. 3D numerical simulations and full scale measurements of snow depositions on a curved roof / T. K. Thiis, J. Potac, J. F. Ramberg // EACWE 5 : Proceedings of the 5th European and African Conference on Wind Engineering, Florence, Italy, 19–23 July 2009. – Florence : Firenze University Press, 2009. – P. 1–8.
- Thiis, T. K. Numerical simulation of snow drift development on a gabled roof / T. K. Thiis, J. Potac // Proceedings of the 7th European and African Conference on Wind Engineering, Amsterdam, the Netherlands, 2011. – [S. l.] : s. n., 2011. – P. 1–8.
- Computer simulation of wind speed, wind pressure and snow accumulation around buildings (SNOW-SIM) / B. Bang, A. Nielsen, P. A. Sundsbo, T. Wiik // Energy and Buildings. – 1994. – Vol. 21, № 3. – P. 235–243. – DOI: 10.1016/0378-7788(94)90039-6.
- Bagnold, R. A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes / R. A. Bagnold. – Mineola : Dover Publications, 2005. – 265 p.
- Seligman, G. Snow Structure And Ski Fields / G. Seligman ; transl. by G. Luchansky. – London : Macmillan and Co, 1936. – 555 p.
- Beyers, J. H. M. Numerical modeling of the snowdrift characteristics surrounding the SANAE IV research station, Antarctica : Ph.D. Dissertation / J. H. M. Beyers. – Stellenbosch : University of Stellenbosch, 2004. – 210 p.
- Beyers, J. H. M. Numerical simulation and verification of drifting snow around a cube / J. H. M. Beyers, P. A. Sundsbo, T. M. Harms // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2004. – Vol. 92, № 9. – P. 725–747.
- Beyers, J. H. M. Numerical simulation of snowdrift around an elevated structure / J. H. M. Beyers, T. M. Harms, P. A. Sundsbo // Proceedings of the Fifth International Snow Engineering Conference, Davos, Switzerland, 5–11 July 2004. – [S. l.] : s. n., 2004. – P. 721–731.
- Tominaga, Y. Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives / Y. Tominaga // Cold Regions Science and Technology. – 2017. – Vol. 139. – P. 53–71. – DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.05.004.

26. Pomeroy, J. W. Snowcover: Accumulation, Relocation and Management / J. W. Pomeroy, D. M. Gray. – Saskatoon : National Hydrology Research Institute, 1995. – 144 p.
 27. Богданов, А. Н. Отец сверхзвуковой аэродинамики. Памяти Теодора фон Кармана / А. Н. Богданов, И. М. Кондратьев // Вестник Российской академии наук. – 2023. – Т. 93, № 3. – С. 289–296.
 28. Snow Load Shape Coefficients and Snow Prevention Method for Stepped Flat Roofs / Z. Zhang, W. Ma, Q. Li, S. Li // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, iss. 22. – Art. 12109. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/22/12109> (дата обращения: 08.04.2026).
 29. Clifton, A. Snow saltation threshold measurements in a drifting-snow wind tunnel / A. Clifton, J.-D. Ruedi, M. Lehning // Journal of Glaciology. – 2006. – Vol. 52, № 179. – P. 585–596.
 30. Pomeroy, J. W. Saltation of Snow / J. W. Pomeroy, D. M. Gray // Water Resources Research. – 1990. – Vol. 26, № 7. – P. 1583–1594.
 31. Pomeroy, J. W. Steady-state suspension of snow / J. W. Pomeroy // Journal of Hydrology. – 1992. – Vol. 136, № 1/4. – P. 275–301.
- References**
1. Olyoh, A. G. Osobennosti opredeleniya snegovykh nagruzok na stroitel'nye konstrukcii = Features of determining snow loads on building structures / A. G. Olyoh // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2025. – № 2 (137). – S. 35–41. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-137-2-35-41.
 2. Mitsuhashi, H. Snowdrifting in building and wind tunnel experiment using model snow / H. Mitsuhashi // Journal of the Japanese Society of Snow and Ice. – 2003. – Vol. 65. – P. 287–295.
 3. Shuji, S. Wind Tunnel on effect of roof wind pressure of buildings on shaping roof snow accumulations / S. Shuji, A. B. E. Osamu, J. O. H. Osamu // Journal of Structural and Construction Engineering. – 2009. – Vol. 74. – P. 451–458.
 4. Oikawa, S. Study of wind tunnel similarity on snowdrift around buildings / S. Oikawa, T. Tomabechi, T. Ishihara // Nagare. – 2007. – Vol. 26. – P. 319–324.
 5. Kind, R. J. Snow Drifting / R. J. Kind // Handbook of Snow. Principles. Processes / Management and Use ; [ed.] D. M. Gray. – Oxford : Pergamon Press, 1981. – P. 338–359.
 6. Iversen, J. D. Drifting-snow similitude-transport rate and roughness modeling / J. D. Iversen // Journal of Glaciology. – 1980. – Vol. 94. – P. 393–403.
 7. Irwin, P. A. Application of Snow Simulation Model Tests to Planning and Design / P. A. Irwin, C. J. Williams // Proceedings of the Eastern Snow Conference, 28, 40th Annual Meeting. – Toronto : Eastern Snow Conference, 1983. – P. 118–130.
 8. Peterka, J. A. On the relaxation of saltation length as a modeling criteria for particulate transport by wind / J. A. Peterka, R. L. Petersen // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1990. – Vol. 36. – P. 867–876.
 9. Nara, R. Numerical simulation of snowdrift development in non-equilibrium flow fields around buildings / R. Nara, C. Groth, M. E. Biancolini // Fluids. – 2025. – Vol. 10, iss. 4. – Art. 75. – P. 1–21. – URL: <https://www.mdpi.com/2311-5521/10/4/75> (data obrashcheniya: 08.04.2026).
 10. A review on the CFD analysis of urban microclimate / Y. Toparlar, B. Blocken, B. Maiheu, G. J. F. van Heijst // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 80. – P. 1613–1640. – DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.248.
 11. Topograficheskie karty. Belarus'. Besplatnyj interaktivnyj veb-servis : [sajt]. – Minsk, 2026. – URL: <https://ru-ru.topographic-map.com> (data obrashcheniya 25.04.2026).
 12. Stroitel'naya klimatologiya : SNB 2.04.02-2000, Izmenenie № 1. – Minsk : Ministrojarhitektury, 2007. – 33 s.
 13. Tur, V. V. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote po teme «Povedenie issledovaniy izmeneniya klimaticheskikh vozdeystvij na stroitel'nye konstrukcii v Respublike Belarus' s cel'yu vneseniya izmenenij v dejstvuyushchie TNPA» (zaklyuchitel'nyj) / V. V. Tur, S. S. Derechenik, O. P. Meshik [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2015. – 229 s.
 14. Naaim, M. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models / M. Naaim, F. Naaim-Bouvet, H. Martinez // Annals of Glaciology. – 1998. – Vol. 26. – P. 191–196.
 15. Thiis, T. K. Large scale studies of development of snowdrifts around buildings / T. K. Thiis // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2003. – Vol. 91, № 6. – P. 829–839.
 16. Thiis, T. K. Measurements and Numerical Simulation of Development of Snow Drifts on Curved Roofs / T. K. Thiis, J. F. Ramberg // Snow Engineering VI : Proceedings of the 6th International Conference, Whistler, BC, Canada, 2008. – [S. l.] : ECI, 2008. – P. 1–5.
 17. Thiis, T. K. 3D numerical simulations and full scale measurements of snow depositions on a curved roof / T. K. Thiis, J. Potac, J. F. Ramberg // EACWE 5 : Proceedings of the 5th European and African Conference on Wind Engineering, Florence, Italy, 19–23 July 2009. – Florence : Firenze University Press, 2009. – P. 1–8.
 18. Thiis, T. K. Numerical simulation of snow drift development on a gabled roof / T. K. Thiis, J. Potac // Proceedings of the 7th European and African Conference on Wind Engineering, Amsterdam, the Netherlands, 2011. – [S. l. : s. n.], 2011. – P. 1–8.
 19. Computer simulation of wind speed, wind pressure and snow accumulation around buildings (SNOW-SIM) / B. Bang, A. Nielsen, P. A. Sundsbo, T. Wiik // Energy and Buildings. – 1994. – Vol. 21, № 3. – P. 235–243. – DOI: 10.1016/0378-7788(94)90039-6.
 20. Bagnold, R. A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes / R. A. Bagnold. – Mineola : Dover Publications, 2005. – 265 p.
 21. Seligman, G. Snow Structure And Ski Fields / G. Seligman ; transl. by G. Luchansky. – London : Macmillan and Co, 1936. – 555 p.
 22. Beyers, J. H. M. Numerical modeling of the snowdrift characteristics surrounding the SANAE IV research station, Antarctica : Ph.D. Dissertation / J. H. M. Beyers. – Stellenbosch : University of Stellenbosch, 2004. – 210 p.
 23. Beyers, J. H. M. Numerical simulation and verification of drifting snow around a cube / J. H. M. Beyers, P. A. Sundsbo, T. M. Harms // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2004. – Vol. 92, № 9. – P. 725–747.
 24. Beyers, J. H. M. Numerical simulation of snowdrift around an elevated structure / J. H. M. Beyers, T. M. Harms, P. A. Sundsbo // Proceedings of the Fifth International Snow Engineering Conference, Davos, Switzerland, 5–11 July 2004. – [S. l. : s. n.], 2004. – P. 721–731.
 25. Tominaga, Y. Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives / Y. Tominaga // Cold Regions Science and Technology. – 2017. – Vol. 139. – P. 53–71. – DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.05.004.
 26. Pomeroy, J. W. Snowcover: Accumulation, Relocation and Management / J. W. Pomeroy, D. M. Gray. – Saskatoon : National Hydrology Research Institute, 1995. – 144 p.
 27. Bogdanov, A. N. Otec sverhzhukovoj aerodinamiki. Pamyati Teodora fon Karmana / A. N. Bogdanov, I. M. Kondrat'ev // Vestnik Rossijskoj akademii nauk. – 2023. – Т. 93, № 3. – С. 289–296.
 28. Snow Load Shape Coefficients and Snow Prevention Method for Stepped Flat Roofs / Z. Zhang, W. Ma, Q. Li, S. Li // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, iss. 22. – Art. 12109. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/22/12109> (data obrashcheniya: 08.04.2026).
 29. Clifton, A. Snow saltation threshold measurements in a drifting-snow wind tunnel / A. Clifton, J.-D. Ruedi, M. Lehning // Journal of Glaciology. – 2006. – Vol. 52, № 179. – P. 585–596.
 30. Pomeroy, J. W. Saltation of Snow / J. W. Pomeroy, D. M. Gray // Water Resources Research. – 1990. – Vol. 26, № 7. – P. 1583–1594.
 31. Pomeroy, J. W. Steady-state suspension of snow / J. W. Pomeroy // Journal of Hydrology. – 1992. – Vol. 136, № 1/4. – P. 275–301.

Материал поступил 24.04.2026, одобрен 27.06.2026, принят к публикации 29.06.2026