

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 004.94:533.6.01

DOI: 10.31857/S2076673422040150, EDN: MHMQAQ

Численное моделирование осаждения снега вблизи снегозадерживающих заборов

© 2022 г. К.Ю. Литвинцев^{1,2*}, А.А. Гаврилов^{1,2}, А.А. Дектерев^{1,2}, Ю.Н. Захаринский¹,
А.В. Минаков¹, С.А. Филимонов^{1,2}, К.А. Финников¹

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия;

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Красноярск, Россия

*sttupick@yandex.ru

Numerical simulation of snow deposition around structural snow fences

K. Yu. Litvintsev^{1,2*}, A. A. Gavrilov^{1,2}, A. A. Dekterev^{1,2}, Yu. N. Zaharinsky¹, A. A. Minakov¹,
S. A. Filimonov^{1,2}, K. A. Finnikov¹

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;

²Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

*sttupick@yandex.ru

Received May 20, 2022 / Revised July 19, 2022 / Accepted October 7, 2022

Keywords: *blowing snow, snow deposition, numerical simulation, snow fences.*

Summary

The results of numerical modeling of the influence of geometric characteristics of snow-protecting fences on the intensity of snow deposition at the initial stage of formation, that is, without taking into account the influence of the dynamics of the shape of the snow cover surface, are presented. In the most industrialized and densely populated region on the Arctic Krasnoyarsk Territory – the industrial City of Norilsk, daily snowfall can exceed 50 mm, the snow depth reaches, on the average, 47 cm (the largest is 70 cm), while the wind speed – 25–30 m/s. This promotes formation of snow deposition on roads, in residential areas as well as in industrial sites and infrastructure facilities, which hampers and sometimes completely stops operation of them. As part of the solution of these problems, a software package has been developed aimed at numerical modeling of snow transport processes and implementing the snow protection measures. To simulate the dynamics of the wind-induced snow drift, a microscale model of the atmospheric boundary layer was used together with a diffusion-inertial description of the transport of the snow dispersed phase. Analysis of the calculation results shows that the width of the plates, as well as their spatial orientation, have insignificant effect on the snow-holding capacity of fences. The size of the gaps between the rails and the height of the lower gap exerts the greatest influence on the distribution of the intensity of snow deposition, both on the leeward and windward sides of the fence. In general, we can talk about the relationship between the wind speed field formed during the drift around the fence and the distribution of the snow deposition intensity. Thus, a relative decrease in the average wind speed from the leeward side of the fence increases the precipitation intensity. The presented results of numerical modeling do not contradict data of field observations previously obtained by other authors, and, thus, the developed software package allows comparing effectiveness of different snow-protecting constructions.

Citation: Litvintsev K.Yu., Gavrilov A.A., Dekterev A.A., Zaharinsky Yu.N., Minakov A.A., Filimonov S.A., Finnikov K.A. Numerical simulation of snow deposition around structural snow fences. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (4): 539–550 [In Russian].
doi: 10.31857/S2076673422040150, edn: mhmqaq

Поступила 20 мая 2022 г. / После доработки 19 июля 2022 г. / Принята к печати 7 октября 2022 г.

Ключевые слова: *вычислительная гидродинамика, снегоперенос, снегозащитные устройства.*

Описывается математическая модель переноса снега ветром, реализованная в программном инструменте, предназначенном для разработки снегозащитных мероприятий. С его помощью проведено численное исследование влияния геометрических параметров снегозащитных заборов на интенсивность осаждения снега вблизи них. Показано, что наибольшее влияние оказывают прозрачность и высота нижнего зазора забора.

Введение

Красноярский край занимает почти 14% территории России. Протяжённость Красноярского края с севера на юг около 3000 км, и подавляющая его часть находится в области Крайнего Севера. Красноярский край богат природными ресурсами, значительная часть которых также сосредоточена в северных и арктических частях края. Одной из проблем, связанных с освоением этих территорий, считается образование снежных отложений и заносов на объектах инфраструктуры. Северная часть Красноярского края относится к пятому дорожно-климатическому району (районы особенно трудной снегоборьбы). Так, для наиболее промышленно развитой и густонаселённой области Заполярья Красноярского края — Норильского промышленного района — по метеоданным суточное выпадение снега может превышать 50 мм, толщина снежного покрова в среднем достигать 47 см (наибольшая 70 см), а скорость ветра — 25–30 м/с. Всё это приводит к формированию снежных отложений на дорогах и в жилых районах, промышленных и инфраструктурных объектах, которые затрудняют, а иногда и полностью останавливают их эксплуатацию. Нарушается нормальное функционирование транспортных систем и основных инженерных коммуникаций, обеспечивающих жизнеобеспечение населения и деятельность промышленных предприятий. Поэтому совершенствование методов борьбы со снежными заносами и отложениями — актуальная задача, особенно в условиях Крайнего Севера.

Постановка проблемы

Основной способ борьбы с образованием снежных заносов на дорогах — установка различных типов снегозащитных устройств или проведение снегозащитных мероприятий, суть которых сводится к уменьшению снегоприноса к объектам защиты за счёт накопления снега на снегоборных системах или сооружениях, а также формированию условий, препятствующих осадению снега на объекте защиты. В России методы борьбы с образованием снежных заносов и создание теоретических основ для прогнозирования снегопереноса и осадения снега актив-

но разрабатывались примерно до 1970-х годов. Существующая на данный момент в России методология проектирования и способы реализации снегозащитных мероприятий основаны на накопленных к тому времени опыту борьбы со снегом и знаниях о механизмах переноса и осадения снега (Дюнин, 1963; Бялобжеский и др., 1983). Модели расчёта снегопереноса и объёма снежных отложений основаны на балансовых и эмпирических соотношениях. В России на данный момент отсутствуют отечественные программные инструменты, позволяющие рассчитывать снегоперенос и формирование снежных отложений с применением численных методов для проведения научных и прикладных исследований и решения задач проектирования.

Разработкой и развитием современных методов вычислительной гидродинамики, связанных с исследованием процессов переноса снега и образования снежных заносов и отложений для различных приложений, занимаются за рубежом (Tominaga, 2018; Giudice и др., 2019; Tominaga, Stathopoulos, 2020). Анализ литературы показывает, что для моделирования указанных процессов в основном применяются следующие подходы: аэродинамические модели (Constantinescu и др., 2015; McClurea и др., 2017; Petrie и др., 2019); эйлеровы модели (Sundsbo, 1996; Naaим и др., 1998; Beyersa и др., 2004; Thiis, Ramberg, 2008; Kang и др., 2018; Cao и др., 2019); лагранжевы модели (Wang, Huang, 2017; Gao и др., 2018), LBM (The Lattice Boltzmann method) — методы решёточных уравнений Больцмана (Masselot A., Chopard, 1998; Giangreco, 2010) и методы клеточных автоматов (Sharma и др., 2019). Из перечисленных подходов наибольшего прогресса в этой области удалось достичь с применением эйлеровых моделей. Данный подход наиболее общий для решения рассматриваемых задач, он позволяет описывать не только процессы переноса снега, но и моделировать процесс образования, роста и разрушения снежных заносов.

В работе представлен численный анализ влияния геометрических характеристик снегозадерживающих заборов с привлечением разрабатываемого программного инструмента, предназначенного для моделирования снегопереноса на основе методов вычислительной гидродинамики с применением эйлерова подхода для описания движения снежной взвеси. При создании указанного про-

граммного инструмента применяются авторские наработки в области численного моделирования процессов гидродинамики и тепломассопереноса (Dekteryev и др., 2017).

Математическая модель образования снеговых заносов

Для основных задач аэродинамики и снегопереноса считается, что течение воздушных потоков, которые обуславливают поведение снега в пространстве и образование снежных отложений, описываются течением несжимаемой жидкости. Скорость ветра, при которой наблюдается низовая метель, составляет от 5 м/с (Бялобжецкий и др., 1983), что в свою очередь, указывает на турбулентный характер течения. Для описания ветрового потока применяется микромасштабная метеорологическая модель, разработанная для изучения процессов, протекающих в атмосфере города (Filimonov и др., 2021; Мешкова и др., 2021). Математическая модель основывается на нестационарных осреднённых по Рейнольдсу уравнениях Навье–Стокса для несжимаемых течений с переменной плотностью и включает в себя:

уравнение неразрывности: $\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$;

уравнение движения: $d\mathbf{U}/dt = -\nabla p + g \cdot \rho_{ref} \cdot (\theta_{ref} - \theta) / \theta_{ref} + \nabla [\mu (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T)] + \nabla \cdot \mathbf{T}_t$,

уравнение сохранения энергии: $\rho C_p (d\theta/dt) = \nabla \cdot [(\lambda + (\mu_t C_p / Pr_t)) \nabla \theta]$,

где $\mathbf{U}$ – вектор скорости; ρ – плотность; θ – потенциальная температура; θ_{ref} и ρ_{ref} – потенциальная температура и плотность на высоте h в соответствии с начальным и граничным распределением; p – осреднённое давление; μ – динамическая вязкость; $\mathbf{T}_t$ – тензор рейнольдсовых напряжений.

Для описания турбулентных характеристик применяется двухпараметрическая *URANS k- ω SST* модель (Menter, 1994). В качестве граничных условий на входе задаются распределение скорости, потенциальной температуры и турбулентных характеристик для нейтральной атмосферы ($\theta(h) = \text{const}$) (Louis, 1979):

$$u(z) = (u_*/K) \cdot \ln(z/z_0), \quad \varepsilon = u_*^3 / (Kz), \quad k(z) = u_*^2 / C_\mu^{1/2},$$

где $K = 0,4$ – константа Кармана; u_* – динамическая скорость атмосферного пограничного слоя; константа $C_\mu = 0,09$.

Для моделирования переноса снежной взвеси применяется метод моделирования двухфазного течения, основанный на эйлеровом континуальном представлении несущей газовой фазы и дисперсной фазы твёрдых частиц. Установившиеся или слабо меняющиеся во времени течения снежной взвеси характеризуются малостью динамического времени релаксации частиц по сравнению с гидродинамическим временем. В этом случае полная двухскоростная модель сводится к модели с квазиравновесной скоростью межфазного скольжения. Такое приближение справедливо для малоинерционных частиц и называется диффузионно-инерционным описанием переноса частиц (Zaichik и др., 2010).

Частицы снега предполагаются сферами с постоянным диаметром и постоянной плотностью. Объёмная концентрация частиц снега ϕ характеризует долю объёма, занимаемой дисперсной фазой. В диффузионно-инерционной модели уравнение сохранения массы дисперсной фазы принимает вид конвективно-диффузионного уравнения переноса объёмной концентрации частиц:

$$\partial \phi / \partial t + \nabla \cdot [\phi (\mathbf{U} + \mathbf{U}_r)] - \nabla \cdot ((\nu_t / \sigma_\phi) \nabla \phi) = 0,$$

где ν_t – коэффициент турбулентной вязкости; σ_ϕ – турбулентное число Шмидта, равное 0,9; $\mathbf{U}_r$ – скорость межфазного скольжения.

Уравнение на осреднённую скорость частиц сводится к алгебраическому уравнению на скорость межфазного скольжения:

$$\mathbf{U}_r = (\tau_p (\rho_p - \rho) / \rho_p) (\mathbf{g} - (d\mathbf{U}/dt)),$$

где $\mathbf{g}$ – ускорение свободного падения; τ_p – время релаксации частиц; ρ_p – плотность частиц.

Время динамической релаксации одиночной сферической частицы в безграничном потоке определяется как

$$\tau_p = 4\rho_p d_p / (3\rho C_D |\mathbf{U}_r|),$$

где C_D – коэффициент сопротивления.

Этот коэффициент описывается аппроксимацией Шиллера–Неймана: $C_D(Re) = (24/Re_p) \times (1,0 + 0,15 Re_p^{0,687})$, где относительное число Рейнольдса для дисперсной фазы определяется по свойствам несущей фазы и относительной

скорости $Re_p = \rho d_p \cdot |U_r| / \mu$. В модели отсутствуют следующие факторы и явления: турбофорез, подъёмная сила в сдвиговом потоке, межчастичные взаимодействия, влияние частиц на турбулентность, анизотропия турбулентных напряжений, эффект пересечения траекторий.

На поверхности применяют граничное условие первого рода на концентрацию частиц снега $\Phi = \Phi_0$, где Φ_0 – равновесная концентрация снега в слое сальтации (Marsh и др., 2020):

$$\Phi_0 = \rho_{air} (3,29 u^* \rho_p)^{-1} \max(0, 1 - (u_t^2 / u^{*2})), u^* = (\tau / \rho_{air})^{1/2}, u_t = 0,35 + (T - 273,15) / 150 + (T - 273,15)^2 / 8200,$$

где τ – напряжение на поверхности; u_t – пороговое значение динамической скорости, м/с; T – температура воздуха в приземном слое.

Допущение равновесности слоя сальтации предполагает, что интенсивность осаждения снега из слоя сальтации на неподвижную поверхность равна интенсивности эрозии. Данное допущение может применяться при низких метелевых скоростях. Описанная модель снеговетропереноса позволяет оценивать только начальный этап образования снежных отложений, так как не учитывает влияние динамики формы поверхности снежного покрова.

Постановка задачи

Для оценки влияния на формирования снежных отложений геометрических параметров заборов (просветность, относительная величина зазора, горизонтальное или вертикальное расположение досок) проведены расчёты с применением описанной математической моделью снегопереноса. Схема моделируемых снегозадерживающих заборов приведена на рис. 1, в соответствии с ней: H – высота забора, м; h – высота нижнего зазора, м; a – ширина пластины на панели забора, м; b – зазор между пластинами, м; $P = b / (a + b) \cdot 100\%$ – просветность панели забора, %. Высота забора H для всех вариантов 6 м, что соответствует максимальной высоте существующих заборов на севере Красноярского края. Скорость ветра принималась равной 10 м/с на высоте флюгера (10 м), что отвечает относительно слабому снегопереносу. Сетка для разных вариантов заборов составляла величину от 1,6 до 2,0 млн расчётных ячеек.

Выбор вариантов геометрических параметров заборов для расчётных исследований обусловлен анализом практики применения снегозадерживающих устройств в мире (Tabler, 2003), в России

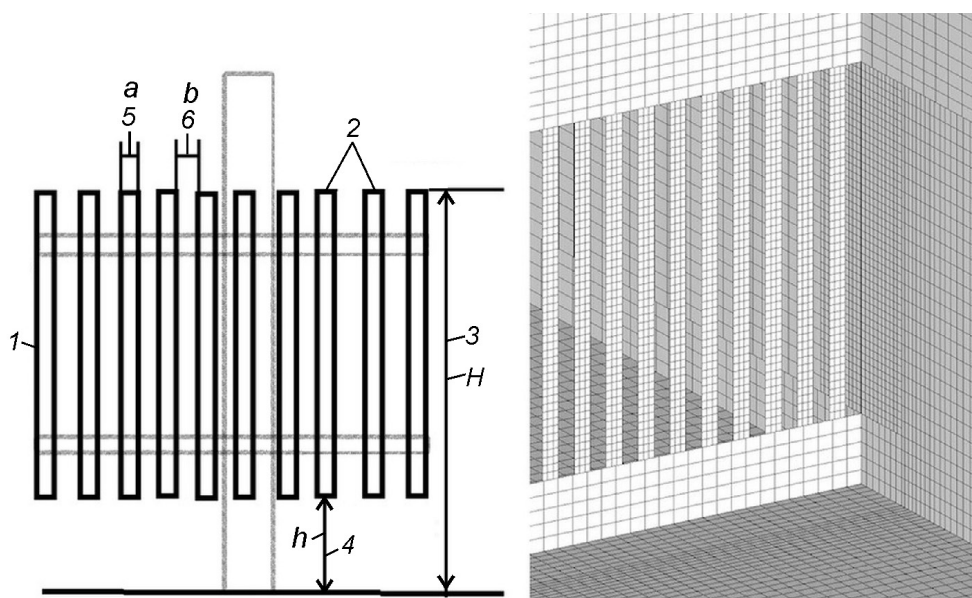


Рис. 1. Геометрические параметры снегозадерживающего забора (слева):

1 – панель забора; 2 – пластина; 3 – высота забора H ; 4 – высота нижнего зазора h ; 5 – ширина пластины на панели забора; 6 – зазор между пластинами; дискретизация расчётной области (справа) вблизи забора

Fig. 1. Geometry of the snow fence (left):

1 – fence panel; 2 – board; 3 – height of the fence H ; 4 – height of the bottom gap h ; 5 – width of the boards on the fence panel; 6 – gap between the boards; discretization of the calculation domain (right) near the fence

Характеристика основных вариантов расчётов*

Номер варианта	Описание	Комментарий
1	$P = 50\%$; $h = 1,0$ м; вертикальные пластины	Базовый вариант
2	$P = 70\%$; $h = 1,0$ м; вертикальные пластины	Увеличение просветности
3	$P = 33\%$; $h = 1,0$ м; вертикальные пластины	Уменьшение просветности
4	$P = 50\%$; $h = 1,5$ м; вертикальные пластины	Увеличение нижнего зазора
5	$P = 50\%$; $h = 0,6$ м; вертикальные пластины	Уменьшение нижнего зазора
6	$P = 50\%$; $h = 1,0$ м; горизонтальные пластины	Изменение ориентации пластин

* P – просветность забора; h – высота нижнего зазора.

(Бялобжеский и др., 1983) и на севере Красноярского края. Согласно данным исследований, наиболее эффективной просветностью заборов для максимального объёма снегозадержания считается величина 50–55%; в России для двурядных систем в целях экономии предлагается применять для дальних от объектов защиты рядов просветность в 70%. На севере Красноярского края просветность оставшихся в удовлетворительном состоянии заборов колеблется от 60 до 70%. Поэтому выбраны варианты расчётов с просветностью 50 и 70%. Дополнительно рассмотрен вариант с просветностью 33% для анализа изменения интенсивности осадения снега в зависимости от просветности. Для существующих 6-метровых заборов на севере Красноярского края высота нижнего зазора может достигать 1,5 м, что обосновывалось необходимостью учёта фоновой глубины снега. В работах (Бялобжеский и др., 1983; Table, 2003) высота нижнего зазора не связана с высотой фонового снега и составляет от 0,1 до 0,15 H для 6-метрового забора от 0,6 до 0,9 м соответственно. На основании этого рассмотрены три варианта высоты нижнего зазора 0,6 и 1,5 м (как крайние) и 1 м как промежуточный между ними.

При строительстве заборов могут применяться две схемы крепления досок на панели: вертикальная и горизонтальная. Вертикальное расположение пластин рекомендуется для деревянных заборов, так как в период весеннего таяния при оседании снежных валов расположенные горизонтально доски, работающие на изгиб, отрываются или ломаются (Бялобжеский и др., 1983). Однако заборы с горизонтальным расположением

пластин, в том числе деревянных, эксплуатируются в США, что позволяет в случае забивания нижнего зазора применять горизонтальный зазор между пластинами вместо него (Table, 2003; Sanudo-Fontaneda и др., 2011). На основании всего этого необходимо оценить влияние ориентации пластин непосредственно на осадение снега. Все варианты расчётов приведены в таблице.

Результаты численных исследований

Для базового варианта забора (см. таблицу) представлен наиболее детальный анализ течения снега. Изменения в характере обтекания забора снеговетровым потоком и интенсивности осадения снега для остальных вариантов рассматриваются относительно базового.

При набегании снеговетрового потока на забор (см. таблицу) происходит его торможение перед панелью (рис. 2), а под панелью (в области нижнего зазора) и над ней, наоборот, происходит ускорение потока (рис. 3). Возмущение в потоке, вызванное обтеканием забора, простирается достаточно далеко, более чем на 20 H (максимально рекомендуемое расстояние между забором и объектом защиты (Бялобжеский и др., 1983). Помимо основной области возмущения, выделены ещё две локальные зоны: высокоскоростной поток в приземной области и низкоскоростную область за панелью забора. Первая зона отвечает за выдувание снега под забором и в некоторой области за ним и препятствует заносу снегом самого забора. Для первого варианта в высокоскоростной зоне падение скорости от максимального значения (под панелью забора) в два раза происходит на расстоянии $\sim 5H$. Вторая зона ограничивается областью, в которой происходит выравнивание потока, когда высокоскоростные верхняя и нижняя зоны смыкаются, и для базового варианта её длина составляет примерно 16 H (см. рис. 3, вариант 1). Сразу за забором на начальном участке второй зоны в горизонтальной плоскости формируется периодическая структура течения, состоящая из перемежающихся областей с ускоренным потоком в зазорах между пластинами и вихревыми зонами непосредственно за пластинами. Протяжённость данной области небольшая – менее трети высоты забора, после чего вихри исчезают и происхо-

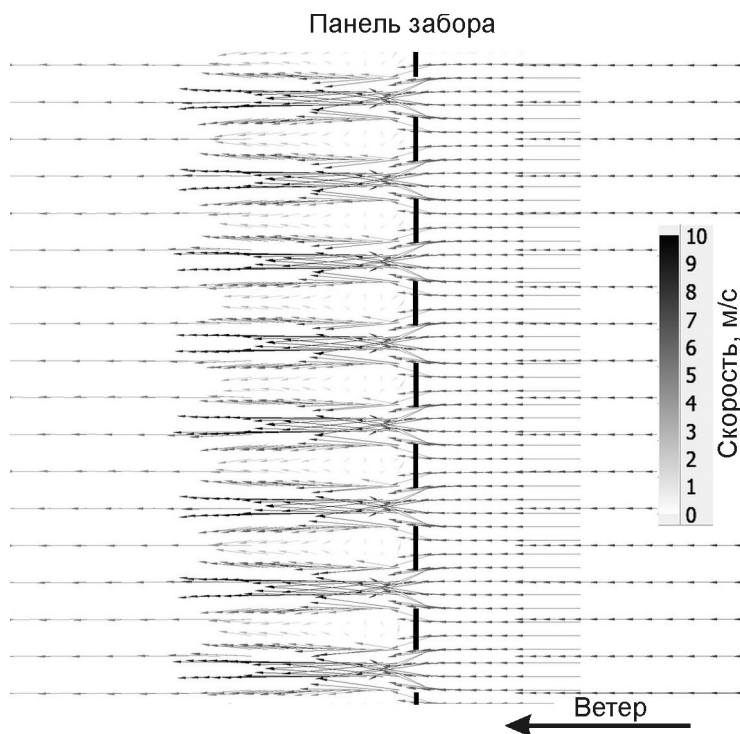


Рис. 2. Векторное поле скорости в горизонтальном сечении на высоте 4 м от земли вблизи забора с вертикальными пластинами, $P = 50\%$, м/с.

Формирование вихревых зон за пластинами и областей локального ускорения потока в зазорах между пластинами

Fig. 2. Velocity vector field in the horizontal plane at the height 4 m near the fence with the porosity $P = 50\%$, m/s, and the vertical boards.

Formation of a vortex behind the boards and areas of local flow acceleration in the gaps between the boards are visible

дит выравнивание потока (см. рис. 2). Несмотря на то, что периодическая структура имеет небольшую протяжённость, вызванная ей горизонтальная неоднородность потока протягивается существенно дальше.

При обтекании ветровым потоком забора происходит интенсивный рост турбулентной энергии. Максимальная генерация турбулентности наблюдается непосредственно в области решётчатой панели, а наиболее протяжённая образуется при срыве воздушного потока с верхней кромки забора. Данная область — зона турбулентного перемешивания между ускоренным и внешним потоками (Tabler, 2003). Генерируемая турбулентность в нижней части забора (под панелью) достаточно быстро затухает из-за аэродинамического сопротивления поверхности (рис. 4).

На рис. 5 представлено распределение концентрации снега в слое сальтации для варианта 1 (см. таблицу), которая напрямую определяется значением напряжения на поверхности τ и связана со скоростью в приземной области.

Установлено, что максимальные концентрации достигаются в области торможения перед забором и в низкоскоростной области с подветренной стороны забора и, наоборот, для нижнего зазора, в котором происходит ускорение потока. Отмечено, что полученные концентрации снега в слое сальтации согласуются с данными других авторов (Pomeroy, Gray, 1990).

В рамках исследования для повышения равномерности сетки во всех вариантах применялась ширина пластин на панели забора равная 0,25 м, несмотря на то, что обычно она меньше 0,2 м. Для обоснования возможности применения данной ширины проведено сравнение интенсивности осаднения для заборов с вертикальным расположением пластин на панели и одинаковой просветностью 50%, но с разной шириной пластин: 0,125, 0,15, 0,187 и 0,25 м. В результате расчётов показано, что ширина пластин слабо влияет на характер распределения интенсивности осаднения снега с подветренной стороны, но вызывает заметный рост

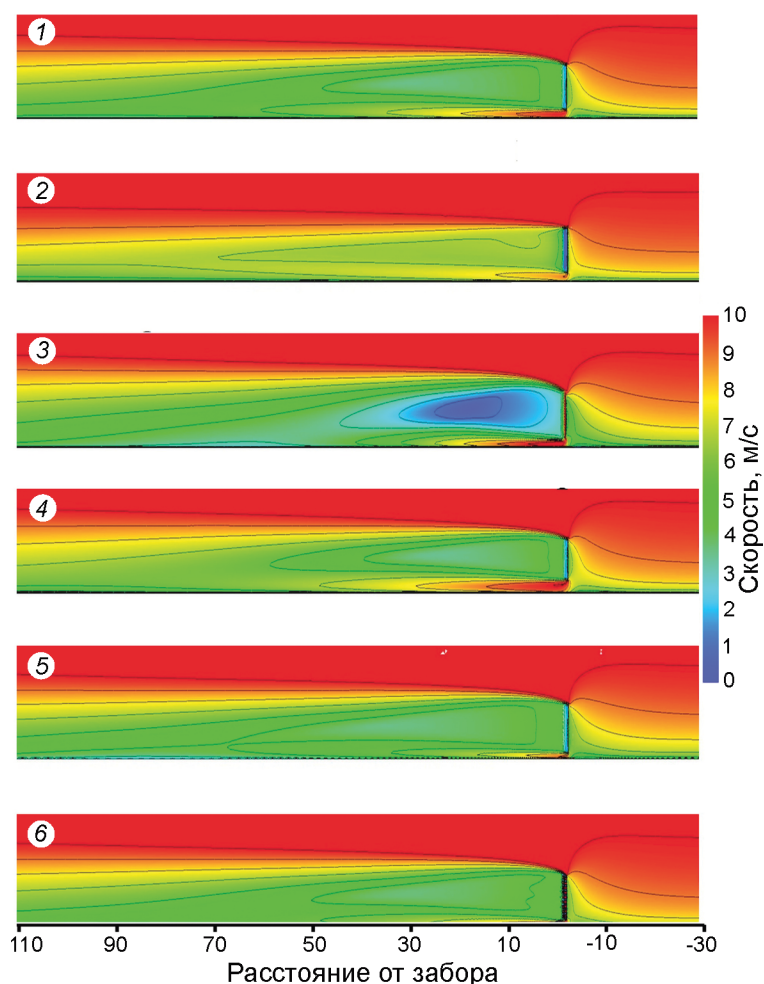


Рис. 3. Магнитуда поля скорости в вертикальном сечении для разных вариантов (см. таблицу), м/с.

Варианты: 1 – $P = 50\%$, $h = 1,0$ м, вертикальные пластины; 2 – $P = 70\%$, $h = 1,0$ м, вертикальные пластины; 3 – $P = 33\%$, $h = 1,0$ м, вертикальные пластины; 4 – $P = 50\%$, $h = 1,5$ м, вертикальные пластины; 5 – $P = 50\%$, $h = 0,6$ м, вертикальные пластины; 6 – $P = 50\%$, $h = 1,0$ м, горизонтальные пластины. Масштаб изображения по высоте увеличен в 2 раза. Влияние геометрических параметров снегозадерживающего забора на формирование высокоскоростных областей в области нижнего зазора и над забором и низкоскоростной области за панелью забора

Fig. 3. Velocity magnitude field, m/s, in the vertical plane in different variants (see Table), m/s.

Variants: 1 – P (porosity) = 50%, h (height of the bottom gap) = 1,0 m, vertical boards; 2 – $P = 70\%$, $h = 1,0$ m, vertical boards; 3 – $P = 33\%$, $h = 1,0$ m, vertical boards; 4 – $P = 50\%$, $h = 1,5$ m, vertical boards; 5 – $P = 50\%$, $h = 0,6$ m, vertical boards; 6 – $P = 50\%$, $h = 1,0$ m, horizontal boards. The vertical scale of the diagram is twice the horizontal scale. Influence of the geometry of the snow fence on the formation of high-velocity areas in the lower gap and above the fence and a low-velocity area behind the fence panel

интенсивности осадения при увеличении ширины пластин с наветренной стороны (рис. 6, а). Но поскольку основные отложения снега сосредоточены с подветренной стороны забора, интегральные значения интенсивности осадения имеют близкие значения для всех вариантов ширины пластин и не превышают $\sim 10\%$. На основании данных результатов ширина пластин 0,25 м принята как базовая.

При изменении просветности с 50 до 70% (см. табл. 2) меняется периодическая структура за ре-

шётчатой панелью, что связано с увеличением размеров высокоскоростных областей. Это приводит к продлению зоны с неоднородными скоростями в горизонтальной плоскости и в целом к росту средней скорости за забором. Вместе с тем локальная скорость в области нижнего зазора падает по сравнению с первым вариантом (см. рис. 3, варианты 1, 2). С увеличением просветности интенсивность и протяжённость области генерации турбулентности с подветренной стороны забора непосредственно за панелью растёт, но

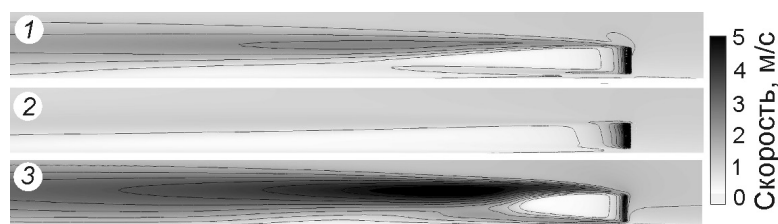


Рис. 4. Поле турбулентной кинетической энергии в вертикальном сечении, $\text{м}^2/\text{с}^2$.

Влияние изменения просветности забора на генерацию турбулентности в области нижнего зазора, над забором и за панелью забора ($h = 1,0$ м, вертикальные пластины): 1 – $P = 50\%$; 2 – $P = 70\%$; 3 – $P = 33\%$

Fig. 4. Turbulent kinetic energy field in the vertical plane, m^2/s^2 .

Turbulence generation in dependence on the snow fence porosity in the lower gap, under fence and behind ($h = 1,0$ м, vertical boards for all variants): 1 – $P = 50\%$; 2 – $P = 70\%$; 3 – $P = 33\%$

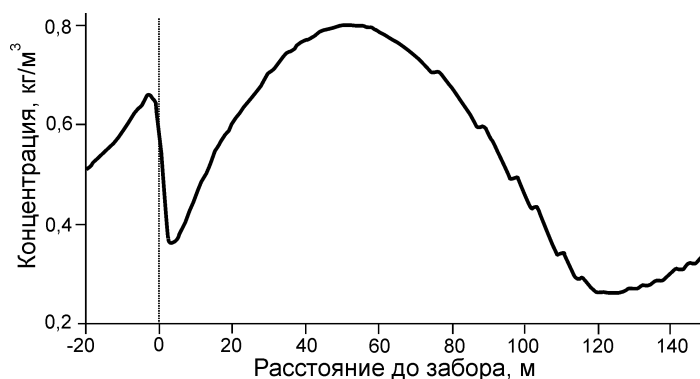


Рис. 5 Распределение концентрации снега в слое сальтации вблизи забора с вертикальными пластинами, $P = 50\%$ и $h = 1$ м (см. таблицу).

Области высоких концентраций снега соответствуют областям с относительно низкими скоростями, и, наоборот, области низких концентраций отвечают областям с относительно высокими скоростями

Fig. 5. Distribution of saltating snow concentration near the fence of vertical boards with $P = 50\%$, $h = 1$ м.

Areas of high snow concentrations are the same as the areas of relatively low air velocities, and, vice-versa, areas of low snow concentrations are the same as the areas of relatively high air velocities

при этом за её нижней и верхней кромками практически прекращается. В результате за забором не формируются турбулентные «хвосты», которые наблюдаются при более низких значениях просветности, что способствует более быстрому затуханию возмущения во внешнем потоке, вызванного обтеканием забора (см. рис. 4).

Когда просветность с 50 падает до 33% (см. табл. 3) происходит, наоборот, уменьшение горизонтальных высокоскоростных областей с подветренной стороны решётчатой панели. Это приводит к сокращению зоны с неоднородными скоростями, падению средней скорости за забором и росту локальной скорости в области нижнего зазора. Однако, несмотря на более высокую скорость в области нижнего зазора, её падение ниже по потоку происходит быстрее (см. рис. 3). Кроме этого, с уменьшением просветности ин-

тенсивность и протяжённость области генерации турбулентности за панелью забора падает, а за его нижней и верхней кромками, наоборот, значительно возрастает. При этом расстояние от забора, на котором наблюдается смыкание турбулентных «хвостов» от нижней и верхней кромок, сокращается примерно в два раза по сравнению 50%-й просветностью (см. рис. 4, вариант 1).

Изменения характера течения при обтекании забора снеговетровым потоком в случае применения разной величины просветности (см. таблицу, варианты 1–3) приводят к существенным отличиям распределения интенсивности осадения снега как с подветренной, так и с наветренной сторон забора. С увеличением просветности с наветренной стороны падает не только максимальная величина интенсивности осадения снега, но и её протяжённость, и таким об-

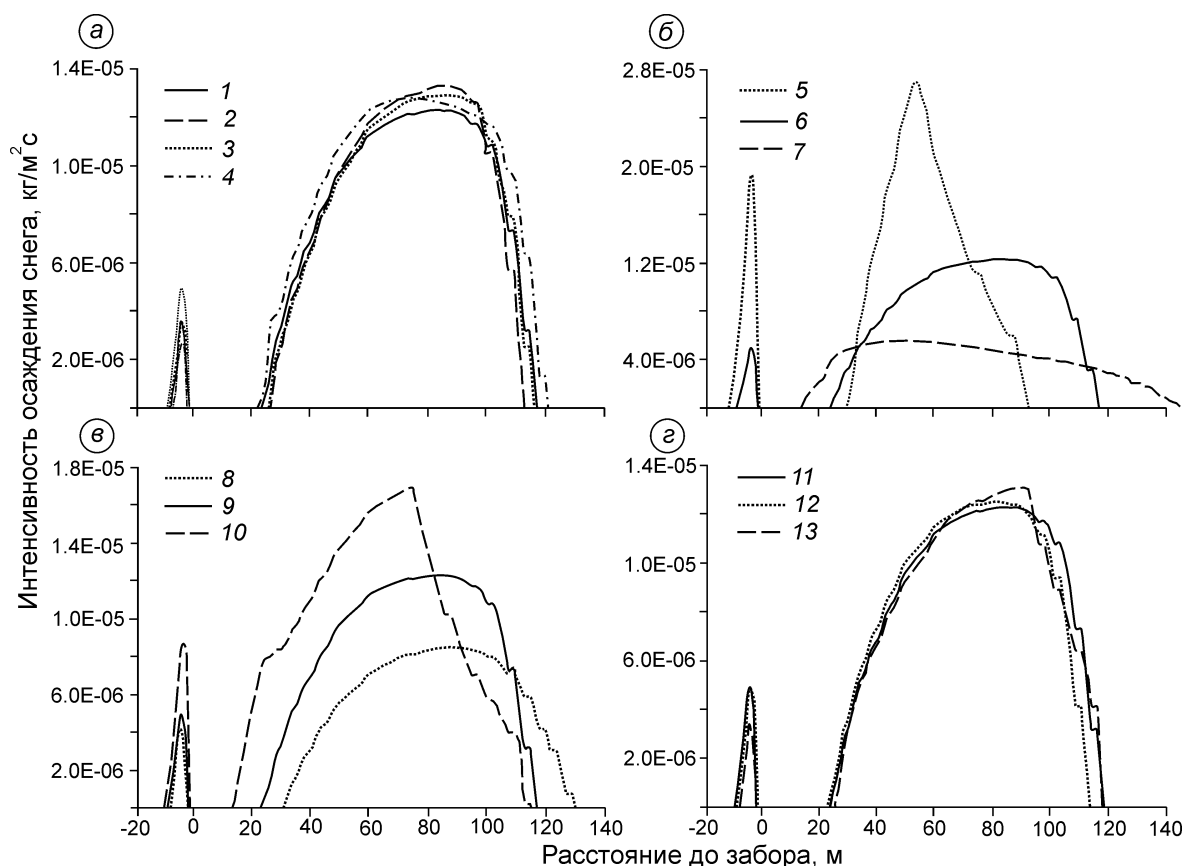


Рис. 6. Влияние изменения геометрических характеристик забора на распределение интенсивности осадения снега (*а, в, г* – 50% просветность, $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$):

а – ширина элементов решетки, м: 1 – 0,125; 2 – 0,15; 3 – 0,187; 4 – 0,25; *б* – просветность, %: 5 – 33; 6 – 50; 7 – 70; *в* – высота нижнего зазора: 8 – 0,6 м (0,1*H*); 9 – 1,0 м (0,17*H*); 10 – 1,5 м (0,25*H*); *г* – ориентация элементов решетки: 11 – вертикальная (ширина 0,25 м); 12 – горизонтальная (ширина 0,25 м); 13 – горизонтальная (ширина 0,125 м)

Fig. 6. Distribution of the snow deposition rate, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ in dependence on the snow fence geometric parameters (*а, в, г* – 50% porosity, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$):

а – width of the boards, m: 1 – 0,125; 2 – 0,15; 3 – 0,187; 4 – 0,25; *б* – porosity, %: 5 – 33; 6 – 50; 7 – 70; *в* – the bottom gap is 8 – 0,6 m (0,1*H*); 9 – 1,0 m (0,17*H*); 10 – 1,5 m (0,25*H*); *г* – the orientation and the width of the boards: 11 – vertical, 0,25 m; 12 – horizontal, 0,25 m; 13 – horizontal, 0,125 m

разом уменьшение просветности способствует более быстрому росту снежного вала с наветренной стороны забора. С подветренной стороны увеличение просветности также приводит к уменьшению скорости осадения снега, но в отличие от наветренной стороны растёт ее протяжённость (см. рис. 6, *б*). Интегральные значения интенсивности осадения снега максимальны для наиболее низкой просветности (33%), при просветности забора 50% снижаются до ~10%, а при 70% уменьшаются ещё на ~40%.

Изменение высоты нижнего зазора в целом меньше влияет на структуру течения по сравнению с просветностью. Так, изменении высоты нижнего зазора с 1 ($h = 0,17H$, вариант 1) до 1,5 м

($h = 0,25H$, вариант 4) приводит, с одной стороны, к увеличению протяжённости высокоскоростной области вблизи поверхности, а с другой – к уменьшению области низких скоростей за панелью (см. рис. 3). Уменьшение высоты нижнего зазора с 1 до 0,6 м ($h = 0,1H$, вариант 5), наоборот, вызывает уменьшение протяжённости высокоскоростной области вблизи поверхности и увеличение области низких скоростей за панелью (см. рис. 3). Увеличение или уменьшение протяжённости области низких скоростей за панелью связано прежде всего с изменением высоты самой панели при изменении величины нижнего зазора.

Несмотря на меньшее влияние высоты нижнего зазора на структуру течения по сравнению

Обсуждение

с просветностью, распределение интенсивности осадения снега соизмеримо меняется при варьировании данного параметра. С увеличением высоты с наветренной стороны падает максимальная величина интенсивности осадения снега, при этом её протяжённость практически не меняется. Наибольшее изменение интенсивности осадения с наветренной стороны происходит при увеличении высоты с 0,6 до 1 м. При переходе к высоте зазора в 1,5 м с 1 м интенсивность уже меняется слабо. Таким образом, уменьшение высоты зазора способствует более быстрому начальному росту снежного вала с наветренной стороны забора. С подветренной стороны увеличение высоты нижнего зазора приводит к уменьшению интенсивности осадения снега и смещению области осадения от забора при слабом изменении её протяжённости. Интегральное значение интенсивности осадения максимально для наиболее низкой высоты нижнего зазора – 0,6 м, при увеличении высоты до 1 м оно снижается на ~20%, а при высоте 1,5 м уменьшается ещё на ~30% (см. рис. 6, в).

Изменение ориентации пластин на панели забора с вертикального положения (см. таблицу, вариант 1) на горизонтальное (см. таблицу, вариант б) с сохранением величины просветности вызывает небольшую перестройку поля скорости. В частности, высокоскоростная область, формируемая нижним зазором, становится короче, а профиль скорости с наветренной стороны – неоднородным в вертикальной плоскости (см. рис. 3).

При оценке влияния ориентации пластин на распределение интенсивности осадения добавлен вариант с заууженными в два раза горизонтальными пластинами (0,125 м). В результате расчётов получено, что ориентация досок панели, как и их ширина, слабо влияют на характер распределения интенсивности осадения снега с подветренной и наветренной сторон забора (см. рис. 6, г). Интегральные значения интенсивности осадения во всех вариантах не превышают ~10%.

Отметим, что ориентация досок (горизонтальная или вертикальная) слабо влияет на снегозадерживающую способность заборов. Выбор ориентации досок обусловлен в первую очередь особенностями монтажа, применяемыми материалами и полевым опытом эксплуатации (Бялобжеский и др., 1983, Tabler, 2003; Sanudo-Fontaneda и др., 2011).

В рамках работы на основе численного моделирования рассмотрено влияние на начальную интенсивность осадения снега основных геометрических характеристик снегозадерживающих заборов (ширина и ориентация пластин, просветность, высота нижнего зазора) при фиксированных высоте забора ($H = 6$ м) и скорости ветра (10 м/с на высоте 10 м – переход между слабой и обычной метелью (Дюнин, 1963)).

Результаты численного моделирования показывают, что ширина пластин (по крайней мере до определённой величины), а также их пространственная ориентация слабо влияют на снегозадерживающую способность заборов. Выбор ориентации и ширины пластин обусловливается в первую очередь особенностями монтажа, используемыми материалами и полевым опытом эксплуатации. Наиболее существенно влияет на распределение интенсивности осадения снега как с подветренной, так и с наветренной сторон забора величина просветности. Наибольшая интегральная величина осадения получена для заборов с просветностью 33%, при повышении просветности до 50% эффективность осадения снижается примерно на 10%, а при просветности 70% – ещё на 40%. При этом эффективность работы забора с просветностью 33% по мере роста снежных отложений, особенно с наветренной стороны, будет быстро снижаться относительно вариантов с более высокой просветностью. Это связано с тем, что интенсивный рост снежных отложений происходит в непосредственной близости от забора, что приводит к его постепенному заносу снегом, особенно при усилении метели, когда его проницаемость становится отрицательной (с подветренной стороны формируются возвратные вихри). Таким образом, на основе анализа распределения интенсивности и суммарной величины осадения снега можно сделать вывод, что забор с просветностью 50% – наиболее оптимальный вариант из рассмотренных.

Помимо просветности, высота нижнего зазора также существенно влияет на эффективность снегозадержания. Результаты численного моделирования показывают, что с уменьшением высоты зазора эффективность снегозадержания увеличивается. Так, интегральные значения интенсивности осадения максимальны для высоты нижнего

зазора 0,6 м, при увеличении высоты до 1 м снижаются на ~20%, а при высоте 1,5 м уменьшаются ещё на ~30%. Отмечено, что, в отличие от вариантов с изменяемой просветностью, при варьировании высоты нижнего зазора область осаднения снега смещается, практически не меняя свою протяжённость. Несмотря на то, что наибольшую эффективность снегозадержания показывает вариант с наименьшей высотой зазора, в этом случае возрастает вероятность его забивания снегом при интенсивных снегопадах в безветренную или слабобетренную погоду. При заносе снегом нижнего зазора снижается эффективность работы снегозадерживающего забора, особенно в случае вертикального расположения пластин.

Для всех рассмотренных вариантов установлена связь скорости с подветренной стороны заборов с распределением интенсивности осаднения снега. Относительное уменьшение средней скорости приводит к увеличению интенсивности осаднения. Так, для варианта 3 (см. таблицу) она максимальна, а с другой стороны — протяжённость высокоскоростной области, формируемой в нижнем зазоре, определяет начало зоны снеговых отложений с подветренной стороны забора (см. рис. 3, вариант б).

Заключение

Результаты численного моделирования влияния геометрических параметров снегозадерживающих заборов на интенсивность осаднения снега показывают, что ширина пластин, а также

их пространственная ориентация слабо влияют на снегозадерживающую способность заборов. Наиболее существенно влияют на распределение интенсивности осаднения снега как с подветренной, так и с наветренной стороны забора величина просветности и высота нижнего зазора. В целом, можно отметить взаимосвязь между полем скорости, формирующимся при обтекании забора, и распределением интенсивности осаднения снега.

Полученные результаты расчётов отражают только начальный этап образования снежных отложений вблизи заборов, т.е. не учитывается влияние динамики формы поверхности снежного покрова. Несмотря на это, они не противоречат ранее полученным обобщённым данным натурных наблюдений (Бялобжеский и др., 1983, Tabler, 2003). Таким образом, разрабатываемый программный инструмент позволяет проводить сравнительную оценку эффективности конструкций снегозащитных устройств при необходимости с учётом их расположения на рельефе, и её применение может качественно повысить уровень разрабатываемых снегозащитных мероприятий. Однако для расширения возможностей данного программного комплекса необходимо дальнейшее развитие математической модели снегопереноса для учёта динамики поверхности снежных отложений и более детального описания механизмов эрозии, сальтации и осаднения. Использование подобных программ позволит усовершенствовать существующие подходы к организации снегозащитных мероприятий и разработке новых конструкций снегозащитных устройств в Российской Федерации.

References

- Beyersa J.H.M., Sundsbø P.A., Harms T.M. Numerical simulation of three-dimensional, Transient snow drifting around a cube. *Journ. of Wind Engineer. and Industr. Aerodynamic*. 2004, 92: 725–747.
- Byalobzhesky G.V., Dyunin A.K., Plaksa L.N., Rudakov L.M., Utkin B.V. *Zimnee soderzhanie avtomobil'nyh dorog*. Winter maintenance of highways. Moscow: Transport, 1983: 197 p. [In Russian].
- Cao Z., Liu M., Wu P. Experiment Investigation and Numerical Simulation of Snowdrift on a Typical Large-Span Retractable Roof. *Complexity*. 2019, 2019: 1–14. doi: 10.1155/2019/5984804.
- Constantinescu G., Muste M., Basnet K. Optimization of snow drifting mitigation and control methods for Iowa conditions. Final Report. Iowa City: Iowa State University. Iowa. 2015: 123 p. doi: 10.13140/RG.2.2.29517.28642.
- Dekteryev A.A., Litvintsev K.Yu., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B. The development of free engineering software package for numerical simulation of hydrodynamics, heat transfer, and chemical reaction processes. *Bull. of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. 2017, 10 (4): 105–112.
- Dyunin A.K. *Mehanika metelej*. The mechanics of blowing snow. Novosibirsk: Russian Academy of Sciences, 1963: 378 p. [In Russian]
- Filimonov S.A., Meshkova V.D., Dekterev A.A., Gavrilov A.A., Litvintsev K.Yu., Shebelev A.V. Analysis of vortex structures formed in the winter in the atmosphere of Kras-

- noyarsk city. Journ. of Physics: Conference Series. 2021, 2088 (1): 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/2088/1/012014.
- Gao G., Zhang Y., Xie F., Zhang J., He K., Wang J., Zhang Y. Numerical study on the anti-snow performance of deflectors in the bogie region of a high-speed train using the discrete phase model. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journ. of Rail and Rapid Transit. 2018, 233 (2): 141–159. doi: 10.1177/0954409718785290.
- Giangreco S. Validation of a Lattice Boltzmann model for snow transport and deposition by wind. Dr.-ing. Germany: Braunschweig – Institute of Technology, 2010: 116 p.
- Giudice A.L., Nuca R., Preziosi L., Coste N. Wind-blown particulate transport: A review of computational fluid dynamics models. Mathematics in Engineering. 2019, 1 (3): 508–547. doi: 10.3934/mine.2019.3.508.
- Kang L., Zhou X., van Hooff T., Blocken B., Gu M. CFD simulation of snow transport over flat, uniformly rough, open terrain: impact of physical and computational parameters. Journ. of Wind Engineer. and Industr. Aerodynamic. 2018, 177: 213–226. doi: 10.1016/J.JWEIA.2018.04.014.
- Louis J.F. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. Boundary Layer Meteorol. 1979, 17: 187–202.
- Masselot A., Chopard B. A lattice Boltzmann model for particle transport and deposition // EPL. 1998, 42 (3): 259–264. doi: 10.1209/epl/i1998-00239-3.
- Marsh C.B., Pomeroy J.W., Spiteri R.J., Wheeler H.S. A finite volume blowing snow model for use with variable resolution meshes. Water Resour. Res. 2020, 56: 1–28. doi: 10.1029/2019wr025307.
- McClurea S., Kimb J.J., Leeb S.J., Zhang W. Shelter effects of porous multi-scale fractal fences. Journ. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2017, 163: 6–14. doi: 10.1016/j.jweia.2017.01.007.
- Meshkova V.D., Dekterev A.A., Litvintsev K.Y., Filimonov S.A., Gavrilov A.A. The role of urban development in the formation of a heat island. Vychislitel'nye tekhnologii. Computational Technologies, 2021, 26 (5): 4–14. doi: 10.25743/ICT.2021.26.5.002. [In Russian].
- Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journ. 1994, 32 (8): 1598–1605.
- Naaim M., Naaim-Bouvet F., Martinez H. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models. Annal. of Glaciology. 1998, 26: 191–196.
- Petrie J., Zhang K., Shehata M. Numerical Simulation of Snow Deposition around Living Snow Fences. Technical Report. Fairbanks: University of Alaska. 2019: 46 p.
- Pomeroy J.W., Gray D.M. Saltation of Snow. Water Resour. Res. 1990, 26 (7): 1583–1594. doi: 10.1029/WR026i007p01583.
- Sanudo-Fontaneda L.A., Castro-Fresno D., del Coz-Diaz J.J., Rodriguez-Hernandez J. Classification and Comparison of Snow Fences for the Protection of Transport Infrastructures. Journ. of Cold Reg. Eng. 2011, 25 (4): 162–181.
- Sharma V., Braud L., Lehning M. Understanding Snow Bedform Formation by Adding Sintering to a Cellular Automata Model. The Cryosphere. 2019, 13: 3239–3260. doi: 10.5194/tc-13-3239-2019.
- Sundsbo P.A. Drift-Flux Modelling and Numerical Simulation of Snow-Accumulation. Proceedings of the 1996 International Snow Science Workshop, Banff, Canada. 1996: 135–139.
- Tabler R.D. Controlling blowing and drifting snow fences and road design. Final Report for NCHRP. 2003: 307 p.
- Thiis T.K., Ramberg J.F. Measurements and numerical simulations of development of snow drifts of curved roofs. Proceedings of the 6th International Conference on Snow Engineering (Snow Engineering VI), Whistler, Canada, 2008: 1–5.
- Tominaga Y., Stathopoulos T. CFD simulations can be adequate for the evaluation of snow effects on structures. Building Simulation. 2020, 13 (4): 729–737. doi: 10.1007/s12273-020-0643-0
- Tominaga Y. Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives. Cold Regions Science and Technology. 2018, 150: 2–14. doi: 10.1016/j.coldregions.2017.05.004.
- Wang Z., Huang N. Numerical simulation of the falling snow deposition over complex terrain. Journ. of Geophys. Research: Atmos. 2017, 122: 980–1000. doi: 10.1002/2016JD025316
- Zaichik L.I., Drobyshevsky N.I., Filippov A.S., Mukin R.V., Strizhov V.F. A diffusion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows. International Intern. Journ. of Heat and Mass Transfer. 2010, 53: 154–162. doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2009.09.044