

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СНЕГОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ

С. А. Филимонов^{1,2}, К. Ю. Литвинцев²,
А. А. Дектерев^{1,2}, А. В. Минаков¹, В. Д. Мешкова¹,
Р. А. Шарафутдинов¹, Ю. Н. Захаринский¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Красноярский филиал Института теплофизики имени С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

APPLICATION OF COMPUTER MODELING METHODS IN THE DESIGN OF SNOW PROTECTION SYSTEMS

Sergey A. Filimonov^{1,2}, Kirill Yu. Litvintsev²,
Aleksandr A. Dekterev^{1,2}, Andrey V. Minakov¹,
Victoria D. Meshkova¹, Ruslan A. Sharafutdinov¹, Yuri N. Zaharinskiy¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

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

Аннотация. В статье рассматривается применение методов численного моделирования процессов переноса снеговетрового потока для определения мест расположения снегозащитных устройств. Численный алгоритм также включает в себя компьютерную обработку метеоданных и цифровую модель рельефа. На основании рассматриваемого подхода был выполнен анализ расстановки снегозадерживающих заборов вдоль участка дороги, заносимого снегом.

Ключевые слова: численное моделирование, снеговетровой поток, снегоперенос, снегозадерживающий забор, цифровая карта рельефа

Abstract. The article discusses the use of numerical modeling methods of snow-wind flow transfer processes to determine the locations of snow protection constructions. The numerical algorithm also includes computer processing of meteorological data and a digital model of topography. Based on this approach, an analysis of the placement of snow-retaining fences along a section of snow-covered road was made.

Key words: numerical modeling, snow-wind flow, snow transfer, snow-retaining fence, digital model of topography

Для цитирования: Применение методов компьютерного моделирования при проектировании снегозащитных систем / С. А. Филимонов, К. Ю. Литвинцев, А. А. Дектерев [и др.]. – DOI 10.31660/2782-232X-2022-3-46-55. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 3 (101). – С. 46–55.

For citation: Filimonov, S. A., Litvintsev, K. Yu., Dekterev, A. A., Minakov, A. V., Meshkova, V. D., Sharafutdinov, R. A., & Zaharinskiy, Yu. N. (2022). Application of computer modeling methods in the design of snow protection systems. Architecture, Construction, Transport, (3(101)), pp. 46-55. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2022-3-46-55.

Введение

Значительная часть территории России расположена в области Крайнего Севера и на территориях, приравненных к нему. Развитие данных территорий имеет большой экономический потенциал. Однако из-за сложных климатических условий требует больших вложений. Для раскрытия экономического и стратегического потенциала северных территорий в России уже начали реализовывать долгосрочные программы, утвержденные в 2021 году, например, программу социально-экономического развития Арктической зоны и комплексный план социально-экономического развития муниципального образования г. Норильск, являющегося крупнейшим промышленным агломератом за Северным полярным кругом.

При развитии северной инфраструктуры необходимо решать множество проблем, и одной из них, помимо низких температур и вечной мерзлоты, является формирование снежных заносов. Заметание снегом дорог, зданий и других объектов инфраструктуры приводит к существенному ухудшению уровня жизни населения

и большим экономическим потерям. На текущий момент одним из основных методов снегоборьбы является уборка снега, которая финансово затратна и требует временного снижения или перекрытия трафика.

Мировой и российский опыт снегоборьбы с метелевыми заносами показывает, что более эффективной мерой является организация дополнительных снегозащитных мероприятий с использованием снегозадерживающих или снегопередающих устройств, снегозащитных лесных полос [1]. Снегозадерживающие устройства, а также лесные полосы должны обеспечивать осаждение снега из метелевого потока до объекта защиты, тогда как снегопередающие устройства за счет повышенной приземной скорости переносят снег через защищаемый участок, как правило, дороги и формируют снежный вал уже за ним.

На текущий момент разработка снегозащитных мероприятий при эксплуатации дорог основывается на ведомственных строительных нормах 1988 года¹ или производных от них современных отраслевых стандартах².

¹ Технические правила ремонта и содержания автомобильных дорог : ВСН 24-88 : издание официальное : утверждены Минавтодором РСФСР 29 июня 1988 г. : введен впервые : дата введения 01.01.1989 / разработан Гипродорнии Минавтодора РСФСР. – Москва : Транспорт, 1989. – Текст : непосредственный.

² Рекомендации по проектированию и применению снегозадерживающих устройств на автомобильных дорогах Государственной компании «Автодор» : СТО АВТОДОР 2.23-2015 : внесен Департаментом проектирования, технической политики и инновационных технологий Государственной компании «Автодор» : утвержден и введен в действие приказом Государственной компании «Российские автомобильные дороги» от 19 ноября 2015 г. № 260. – Текст : электронный // Государственная компания «Автодор» : сайт. – URL: https://russianhighways.ru/upload/iblock/64e/STO_AVTODOR_2_23_2015_Prikaz_260_19_11_2015.pdf (дата обращения: 15.06.2022).

Приведенные в них методики опираются на полуэмпирические модели, которые основаны на обобщенных данных проводимых до 1980-х годов исследований механизмов снеготранспорта и методов снегозадержания, и не позволяют полноценно учитывать локальные особенности рельефа, наличие искусственных препятствий и оценивать динамику осадения снега. Однако современные методы вычислительной гидродинамики и обработки цифровых данных уже позволяют оценивать эффективность снегозащитных мероприятий для конкретных условий на этапе проектирования.

Объект и методы исследования

Математическая модель, описывающая поведение снеговетрового потока

Коллективом авторов разработан инструмент, предназначенный для оценки эффективности снегозадерживающих заборов при проектировании снегозащитных мероприятий, который продолжает совершенствоваться. В его основе лежит математическая модель переноса снеговетрового потока, основанная на решении осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса [2]. Для моделирования переноса снежных частиц реализована диффузионно-инерционная модель движения малоинерционных частиц [3–5]. При расчете осадения/уноса снега используется предположение равновесности слоя сальтации [6] и не учитывается деформация снежного покрова. Реализация численных моделей основана на современных методах вычислительной гидродинамики несжимаемой жидкости: методе контрольного объема для пространственных неструктурированных сеток [7] и SIMPLE-подобном алгоритме [8], предназначенном для связывания полей скорости и давления. Для моделирования турбулентных характеристик используется двухпараметрическая k - ω SST модель вихревой вязкости, позволяющая разрешать пограничные турбулентные слои [9]. Начальное и граничное распределение скорости, температуры и энергии турбулентных пульсаций задаются по условию нейтральной атмосферы. Описанные выше математические

модели были реализованы на базе программного комплекса SigmaFlow, предназначенного для моделирования широкого спектра задач гидродинамики [5, 10–12].

Разработанный инструмент позволяет выполнять исследования по оценке мест образования снежных отложений за естественными и искусственными препятствиями. Результаты этих исследований могут быть применены на практике при проектировании снегозащитных мероприятий.

Далее в статье приведен пример такого исследования, направленного на оценку эффективности расположения снегозадерживающих заборов, размещенных вдоль автомобильной дороги на участке с неблагоприятным снеготранспортом. Стоит отметить, что при рассматриваемых размерах расчетной области прямое сеточное разрешение снегозадерживающих устройств нецелесообразно. Моделирование заборов осуществлялось путем добавления в уравнение сохранения импульса силы, имитирующей гидродинамическое сопротивление, которое возникает при обтекании забора. Величина данного сопротивления рассчитывается на основе численного моделирования обтекания отдельного забора с сеточным разрешением его геометрии.

Использование методов компьютерного анализа для выбора схемы расположения заборов

Рассматриваемый в работе подход к проведению снегозащитных мероприятий предполагает корректировку выработанных общих методических рекомендаций на основании результатов, полученных с помощью современных методов компьютерного анализа и численного моделирования снеговетрового потока.

Алгоритм выбора места и ориентации снегозадерживающих заборов основан на наложении на одну карту областей с оптимальным расположением снегозащитных устройств и областей, в которых расположение заборов либо невозможно, либо нежелательно. Затем задается предполагаемый вариант расположения заборов, путем численного моделирования определяется зона формирования снежного заноса возле них. Ближайшее расположение заборов к дороге приведет к

осаждению снега непосредственно на дорожную часть, а удаленное может привести к снижению эффективности работы снегозащитного устройства, поэтому оптимальное расстояние от дороги до ближайшего снегозадерживающего устройства целесообразно в диапазоне $20H \leq L \leq 30H$ (H – высота забора) в зависимости от рельефа [1, 13]. Ориентация забора определяется направлением господствующего снегопереноса, и, если направление ветра образует с нормалью дороги угол α более $30\text{--}35^\circ$, необходимо расположение косых заборов, перпендикулярных направлению ветра. Области, в которых расположение заборов невозможно или нежелательно, это, в первую очередь, зоны с природными (реками, оврагами и т. п.) и искусственными (зданиями, сооружениями, линиями электропередач и т. д.) препятствиями, затем зоны, в которых происходит естественное осадение снега и слишком большой уклон рельефа (при уклоне рельефа больше 15° расстановка заборов допускается, но на данных участках рельеф начинает искажать форму снежных отложений [13]).

Для получения количественных значений объемов снегопереноса и снегоприноса производят обработку данных метеостанций по

методике, описанной в ОДМ 218.2.045-2014³. В результате удается выделить господствующее направление метелевого ветра, относительно которого и происходит расстановка заборов. Оценка образования областей естественных снежных отложений основывается не только на моделировании снегопереноса при господствующем ветре, но и с учетом возможности снегопереноса с других направлений (в данном случае трех, под углами 90° , 120° и 270° относительно господствующего направления) с соответствующим весом каждого направления.

Анализ ограничений, связанных с рельефом и наличием объектов инфраструктуры, проводится с привлечением ГИС-сервисов (Яндекс. Карты, OpenStreetMap и т. д.). Для этого необходимо иметь цифровую карту местности (карту высот) с привязкой к глобальной (мировой) системе координат. На основе полученной карты высот производится выделение расчетной области и, далее, построение трехмерной гексагональной расчетной сетки (рис. 1). Расчетная область – это параллелепипед, направленный вдоль господствующего направления ветра, нижняя грань которого повторяет рельеф местности. На входной грани параллелепипеда задается ветровой

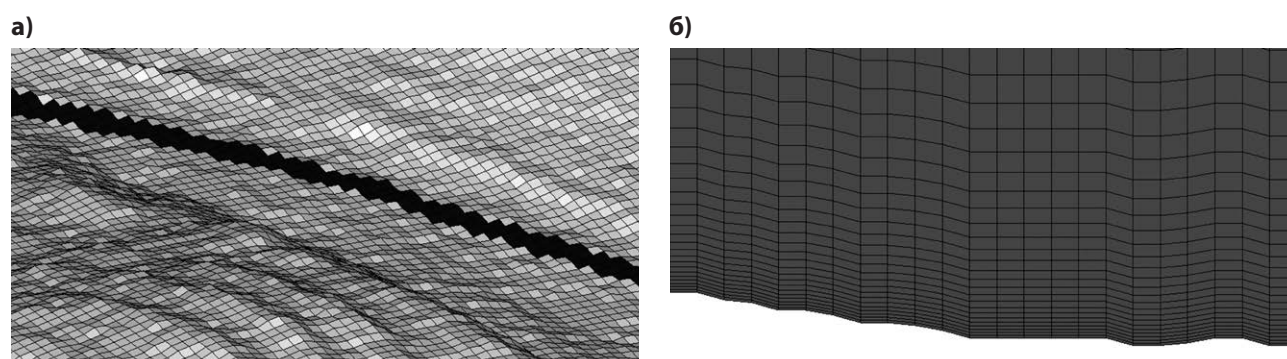


Рис. 1. Расчетная сетка вблизи поверхности:
а) на границе расчетной области; б) в вертикальном сечении

³ Рекомендации по проектированию лесных снегозадерживающих насаждений вдоль автомобильных дорог : ОДМ 218.2.045-2014 : внесен Управлением эксплуатации автомобильных дорог и Управлением проектирования и строительства автомобильных дорог Федерального дорожного агентства : издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 24.12.2014 г. № 2629-р. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200116386> (дата обращения: 15.07.2022).

поток, на выходной – условия свободного массового расхода. На боковых и верхней гранях задаются условия симметрии. Оценка эффективности расположения заборов осуществляется по анализу изменения интенсивности осаднения снега и формирования зон снежных отложений по сравнению с текущей ситуацией.

Результаты

Представленный подход к выбору расположения заборов на основе компьютерного анализа применялся для существующего участка дороги на Крайнем Севере (рис. 2). Анализ метеорологических условий исследуемого участка показал, что господствующее направление снегопереноса составляет 150° по азимуту, а его величина может достигать $200 \text{ м}^3/\text{м}$. При этом направление метелевых ветров носит достаточно устойчивый характер: в угловом интервале 120° – 180° переносится более 90 % снега.

Рельеф местности, расположение защищаемой дороги и других объектов инфраструктуры представлены на рис. 2а. Находящиеся с наветренной стороны объекты инфраструктуры приводят к ограничению мест установки заборов, в частности, невозможности установки многоряд-

ных заборов. Для количественной оценки изменения высоты рельефа относительно дороги вдоль господствующего направления снегопереноса проводилась компьютерная обработка карты высот, результат которой представлен на рис. 2б. Данная карта наряду с картой распределения угла нормали поверхности позволяет проводить анализ рельефа местности. В рассматриваемом случае наибольшее влияние на расстановку заборов оказывает разветвленная ложбина, являющаяся руслом ручья, которая прилегает непосредственно к дороге. Также стоит отметить наличие с наветренной стороны железной дороги и здания, что является искусственным ограничением на возможные места расположения снегозащитных устройств.

Для рассматриваемого участка было выполнено несколько вариантов расчетов снегопереноса. В каждом варианте расчетные области представляли собой прямоугольный параллелепипед размером $4,5 \times 4,5 \times 1 \text{ км}$ (пунктирная линия на рис. 3), которые разбивались примерно на 16 млн ячеек. Первые четыре варианта расчета использовались для определения мест естественного суммарного осаднения снега без заборов с учетом различных направлений ветра:

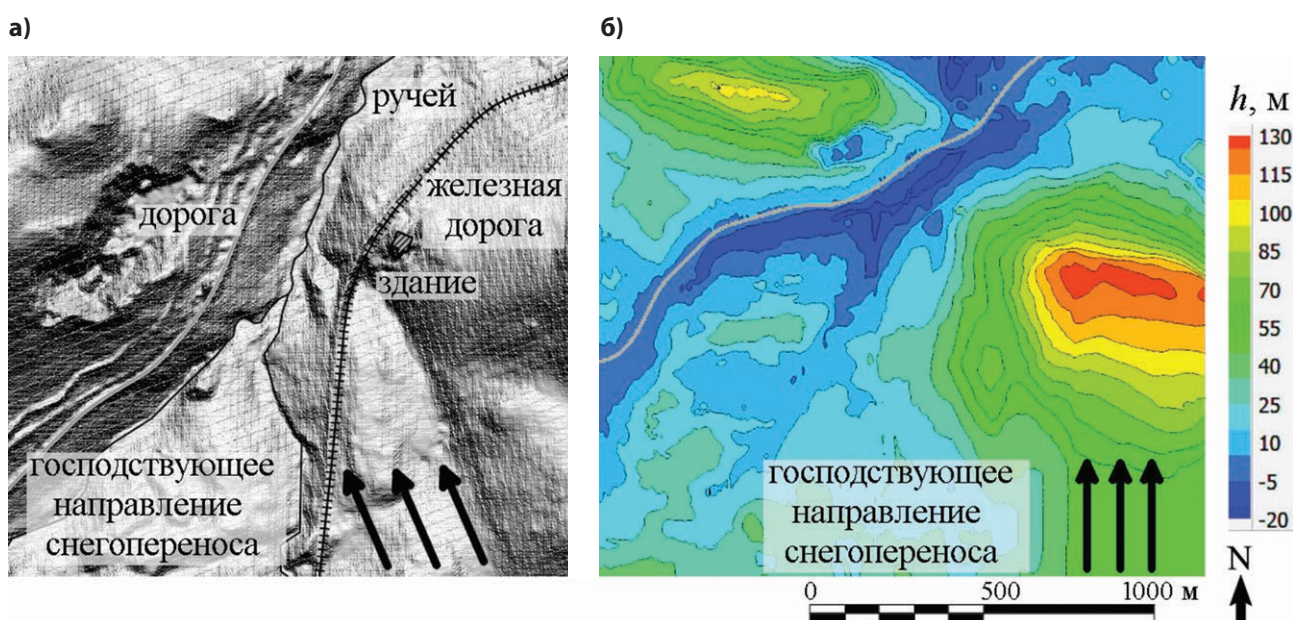


Рис. 2. Выбранный для исследования участок дороги:
а) рельеф местности с инфраструктурой; б) поле высот относительно дороги, м

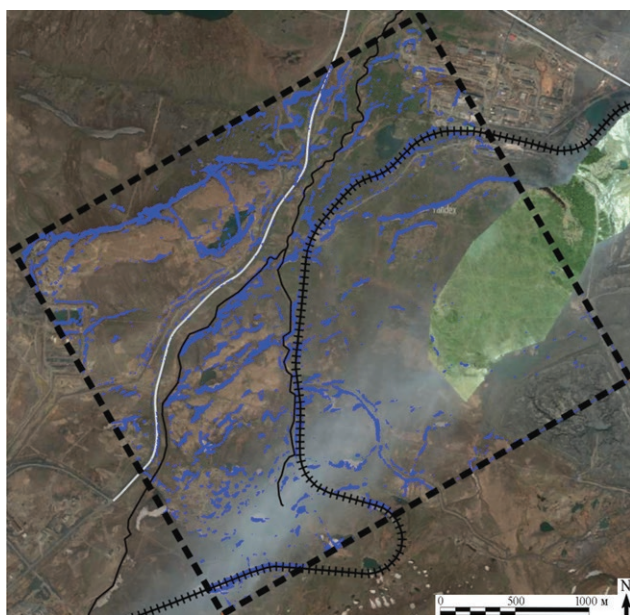


Рис. 3. Расчетная область и места образования естественных снежных отложений

60°, 150°, 240°, 330° по азимуту (области, закрашенные синим цветом, – рис. 3).

В остальных двух расчетных вариантах рассматривались возможные варианты расстановки заборов. Исследования были выполнены для заборов высотой 6 метров с просветностью 50 %. Выбор мест расположения заборов производился на основе анализа: расстояния до дороги вдоль господствующего направления снегопереноса (рис. 4а); естественных снежных отложений (рис. 4б); угловой карты рельефа (рис. 4в); карты относительных высот (рис. 2). Как видно, заборы располагаются вне оптимальных расстояний до дороги (рис. 4а), так как там находится ложбина, и установка заборов в ней приведет к их заносу (рис. 4б). Кроме рельефа (белый цвет заливки областей), осадению метелевого снега способствуют и объекты инфраструктуры, такие как железная дорога (красный цвет) и здание (зеленый цвет), что также накладывает ограничения на возможные места установки заборов (рис. 4б). Что касается угловой карты рельефа, можно отметить, что рельеф рассматриваемого участка является достаточно пологим, за исключением небольшой области, примыкающей к восточной части участка дороги (рис. 4в).

На рис. 5 представлено поле скорости в сечении вдоль потока в области забора. Видно резкое торможение потока о забор и более плавное на спуске рельефа. Сочетание этих факторов уже на этом этапе позволяет оценить области с пониженной скоростью (например, области со скоростью менее 2 м/с показаны синим цветом), где потенциально может происходить осаждение снега. Однако для более точного результата снеговые частицы моделируются в виде дисперсной фазы,

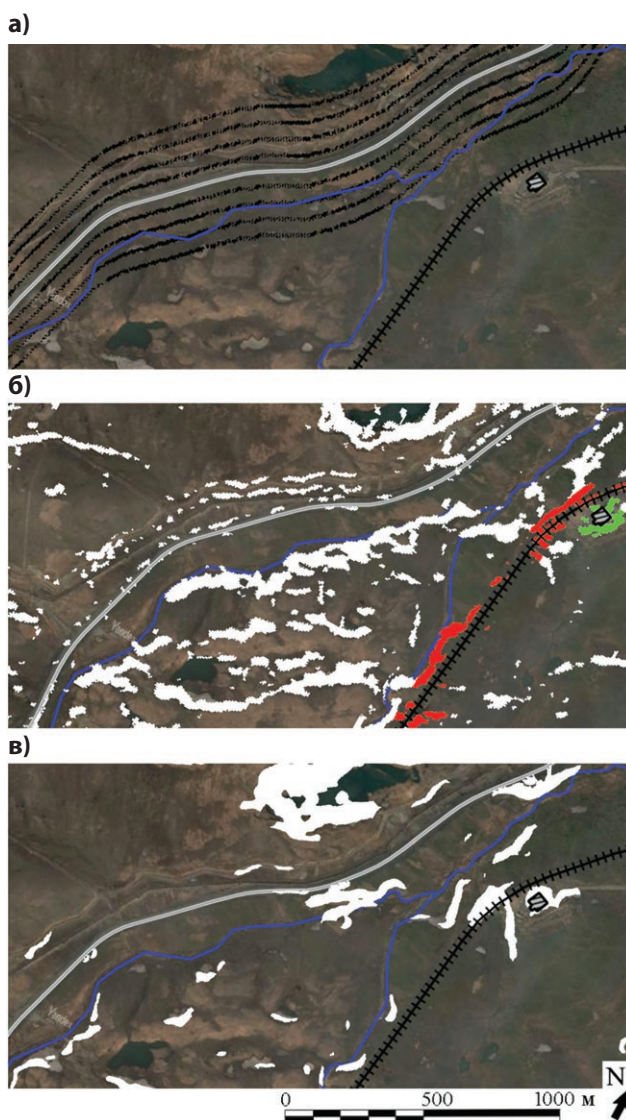


Рис. 4. Выбор мест расположения заборов относительно: а) расстояния до дороги (черными линиями показано расстояние в 10, 20, 30 и 40 высот забора); б) естественных суммарных снежных отложений; в) областей, в которых угол наклона поверхности земли к горизонту более 15°

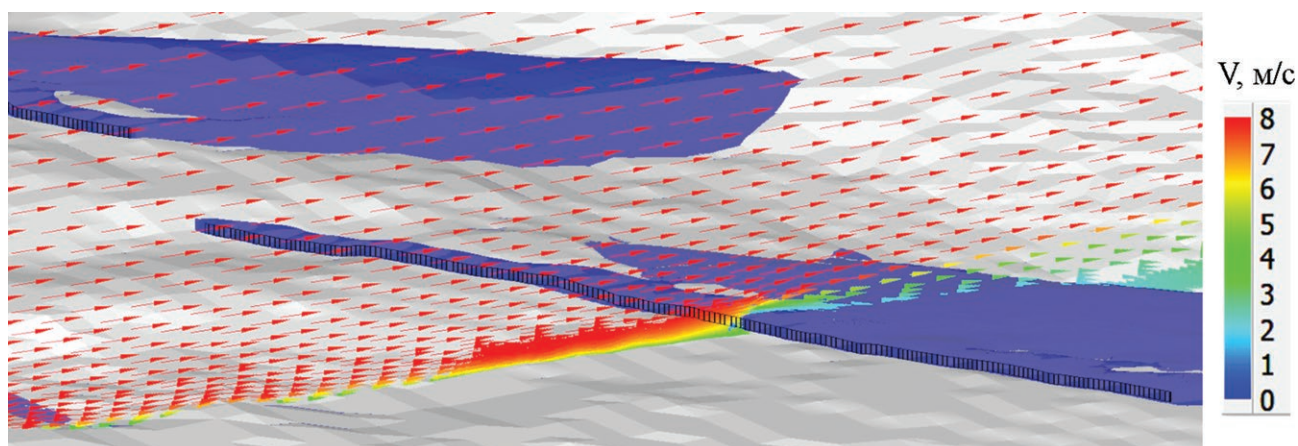


Рис. 5. Обтекание снегозадерживающих заборов.
Векторное поле скорости, м/с. Изоповерхность магнитуды скорости 2 м/с

и можно непосредственно посчитать их поток на поверхность земли, что и показано на рис. 6.

На рис. 6 представлены области снежных отложений для двух вариантов расстановки снегозадерживающих заборов (снежные отложения, формирующиеся непосредственно возле заборов, выделены синим). В первом варианте снегозащитная система состоит из семи заборов (рис. 6а), которые располагаются максимально близко к дороге, по возможности параллельно ей, из-за чего происходит близкое к максимально допустимому отклонение ориентации заборов от направления ветра ($\alpha \sim 30^\circ$).

Часть заборов расположена вблизи локальных вершин местности, и за ними имеется ложбина, в которой наблюдается существенное увеличение области с пониженной скоростью, что приводит к повышению осаднения снежных масс за ними. При этом короткие заборы замедляют поток ветра и собирают снег менее эффективно. Величина угла α также влияет на снегоперенос и приводит к формированию неоднородности области осаднения с подветренной стороны заборов (рис. 6а).

На рис. 6б показана вторая схема размещения заборов, основные отличия от предыдущего варианта – уменьшение числа заборов путем их укрупнения, а также, по возможности, уменьшение угла α . В данном варианте они находятся дальше от оптимальных зон размещения относительно дороги. При новой расстановке также проводился анализ рельефа и зон естественного

осаждения снега, из-за которых пришлось сдвигать заборы после их укрупнения дальше от дороги. В итоге снегозащитная система состоит из трех заборов, которые располагаются насколько возможно близко к дороге: первый забор (самый протяженный) – перпендикулярно направлению ветра, второй из-за рельефа и инфраструктурных ограничений – под углом $\alpha \sim 30^\circ$, третий по тем же причинам имеет угол $\alpha \sim 20^\circ$. Как видно, первый забор имеет более равномерную область осаднения с подветренной стороны, но при этом и меньшую максимальную протяженность по сравнению с тремя заборами предыдущего варианта, расположенными в той же области. Расположение срединного забора не изменялось. Крайний правый забор в целом показывает себя лучше, чем набор трех заборов в предыдущем варианте (рис. 6).

Обсуждение

Представленные результаты показывают, что использование комплексного компьютерного анализа, включающего в себя: численное моделирование переноса снеговетрового потока, обработку данных ГИС для построения дополнительных полей геометрических характеристик рельефа относительно объекта защиты и расчетной области, инструменты визуального анализа, – дает возможность усовершенствовать существующие методики построения снегозащитных систем.

В целом, применение методов компьютерного моделирования при проектировании сне-

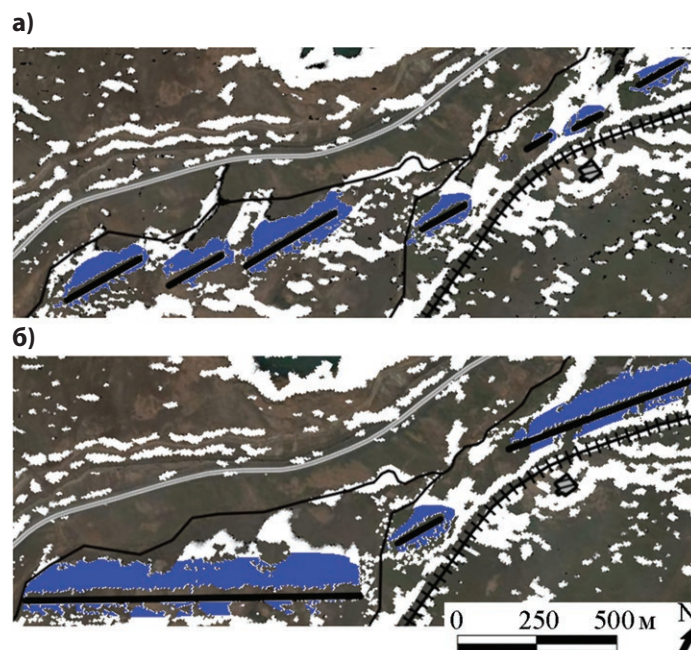


Рис. 6. Формирование снежных отложений на исследуемом участке.
Схемы размещения заборов

гозащитных систем позволяет качественно и количественно оценить результаты вариантов расположения снегозащитных устройств относительно объектов защиты с учетом различных природных и искусственных ограничений.

Выводы

Разработана математическая модель, описывающая поведение снеговетрового потока, которая позволяет прогнозировать места накопления снежных отложений. Данная модель была

реализована в виде программного инструмента для численных исследований по оценке мест образования снежных отложений за естественными и искусственными препятствиями. Основным текущим недостатком предложенного подхода является то, что рассматриваемая математическая модель позволяет только определять области осадения снега, но при этом не учитывает его накопление и деформацию поверхности снежного покрова. Этот недостаток будет исправлен в дальнейших исследованиях.

Библиографический список

1. Зимнее содержание автомобильных дорог / Г. В. Бялобжеский, А. К. Дюнин, Л. Н. Плакса [и др.]; под ред. Дюнина А. К. – 2-е изд., перераб. и доп. – Текст : непосредственный. – Москва : Транспорт, 1983. – 197 с.
2. The influence of landscape and urban development on modeling of transport of pollutants in Krasnoyarsk city / S. A. Filimonov, A. A. Dekterev, A. A. Gavrilov [et al.]. – DOI 10.1088/1742-6596/2057/1/012134. – Текст : непосредственный // Journal of Physics: Conference Series. – Sevastopol, 2021. – P. 012134.
3. Волков, Э. П. Моделирование горения твердого топлива / Э. П. Волков, Л. И. Зайчик, В. А. Першуков. – Текст : непосредственный. – Москва : Наука, 1994. – 320 с.
4. A diffusion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows / L. I. Zaichik, N. I. Drobyshevsky, A. S. Filippov [et al.] – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.044. – Текст : непосредственный // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53. – № 1–3. – P. 154–162.

5. Гаврилов, А. А. Одножидкостная модель смеси для ламинарных течений высококонцентрированных суспензий / А. А. Гаврилов, А. В. Шебелев. – DOI 10.7868/S0568528118020081. – Текст : непосредственный // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2018. – № 2. – С. 84–98.
6. A finite volume blowing snow model for use with variable resolution meshes / C. B. Marsh, J. W. Pomeroy, H. S. Wheeler, R. J. Spiteri. – DOI 10.1029/2019WR025307. – Текст : непосредственный // Water Resources Research. – 2020. – Vol. 56. – № 2.
7. Ferziger, J. H. Computational methods for fluid dynamics / J. H. Ferziger, M. Peric. – Текст : непосредственный. – Berlin et al. : Springer, 2002. – 423 p.
8. Patankar, S. Numerical heat transfer and fluid flow / S. Patankar. – Boca Raton : CRC Press, 1980. – 214 p. – DOI 10.1201/9781482234213. – Текст : непосредственный.
9. Menter, F. Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows / F. Menter. – DOI 10.2514/6.1993-2906. – Текст : непосредственный // 24th Fluid Dynamics Conference. – Orlando, Florida : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993.
10. Дектерев, А. А. Современные возможности CFD кода SIGMAFLOW для решения теплофизических задач / А. А. Дектерев, А. А. Гаврилов, А. В. Минаков. – Текст : непосредственный // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2010. – № 2(4). – С. 117–122.
11. Свободно распространяемый программный комплекс SIGMA_FW для моделирования гидродинамики и теплообмена / А. А. Дектерев, К. Ю. Литвинцев, А. А. Гаврилов [и др.] – Текст : непосредственный // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2017. – Т. 10. – № 4. – С. 534–542.
12. SigmaFlow CFD code as a tool for predicting the wind environment around a group of buildings / V. D. Meshkova, A. A. Dekterev, A. A. Gavrilov, K. Yu. Litvintsev. – DOI 10.1088/1742-6596/1675/1/012119. – Текст : непосредственный // Journal of Physics: Conference Series. – Yalta, Crimea, 2020. – P. 012119.
13. Tabler, R. D. Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design : Final Report / R. D. Tabler. – Текст : непосредственный. – Niwot, Colorado, 2003. – 345 p.

References

1. Byalobzheskiy, G. V., Dyunin, A. K., Plaksa, L. N., Rudakov, L. M., & Utkin, B. V. (1983). Zimnee soderzhanie avtomobil'nykh dorog. 2nd edition, revised. In A. K. Dyunin (ed.). Moscow, Transport Publ., 197 p. (In Russian).
2. Filimonov, S. A., Dekterev, A. A., Gavrilov, A. A., Litvintsev, K. Yu., Shebelev, S. V., & Meshkova, V. D. (2021). The influence of landscape and urban development on modeling of transport of pollutants in Krasnoyarsk city. Journal of Physics: Conference Series, p. 012134. (In English). DOI 10.1088/1742-6596/2057/1/012134.
3. Volkov, E. P., Zaichik, L. I., & Pershukov, V. A. (1994). Modelirovanie goreniya tverdogo topliva. Moscow, Nauka Publ., 320 p. (In Russian).
4. Zaichik, L. I., Drobyshevsky, N. I., Filippov, A. S., Mukin, R. V., & Strizhov, V. F. (2010). A diffusion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows. International Journal of Heat and Mass Transfer, 53(1-3), pp. 154-162. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.044.
5. Gavrilov, A. A., & Shebelev, A. V. (2018). Single-fluid model of a mixture for laminar flows of highly concentrated suspensions. Fluid Dynamics, 53(2), pp. 255-269. (In English). DOI 10.1134/S0015462818020064.
6. Marsh, C. B., Pomeroy, J. W., Wheeler, H. S., & Spiteri, R. J. (2020). A finite volume blowing snow model for use with variable resolution meshes. Water Resources Research, 56(2). (In English). DOI 10.1029/2019WR025307.

-
7. Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). Computational methods for fluid dynamics. 3rd edition, revised. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo, Publ. Springer, 423 p. (In English).
 8. Patankar, S. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow. Boca Raton, Publ. CRC Press, 214 p. (In English). DOI 10.1201/9781482234213.
 9. Menter, F. (1993). Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows. 24th Fluid Dynamics Conference. (In English). DOI 10.2514/6.1993-2906.
 10. Dekterev, A. A., Gavrilov, A. A., & Minakov, A. V. (2010). New features of SIGMAFLOW code for thermophysics problem solving. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii*, (4(2)), pp. 117-122. (In Russian).
 11. Dekterev, A. A., Litvintsev, K. Yu., Gavrilov, A. A., Kharlamova, E. B., & Filimonov, S. A. (2017). Free Software Package SIGMA_FW for Numerical Simulation of Hydrodynamics and Heat Transfer. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 10(4), pp. 534-542. (In Russian).
 12. Meshkova, V. D., Dekterev, A. A., Gavrilov, A. A., & Litvintsev, K. Yu. (2020). SigmaFlow CFD code as a tool for predicting the wind environment around a group of buildings. *Journal of Physics: Conference Series*, p. 012119. (In English). DOI 10.1088/1742-6596/1675/1/012119.
 13. Tabler, R. D. (2003). Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design. Final Report. Niwot, Colorado, 345 p. (In English).

Сведения об авторах

Филимонов Сергей Анатольевич, канд. техн. наук, научный сотрудник Красноярского филиала ИТ СО РАН, e-mail: bdk@inbox.ru

Литвинцев Кирилл Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник Красноярского филиала ИТ СО РАН, e-mail: sttupick@yandex.ru

Дектерев Александр Анатольевич, канд. техн. наук, руководитель Красноярского филиала ИТ СО РАН, e-mail: dekterev@mail.ru

Минаков Андрей Викторович, д-р физ.-мат. наук, доцент, директор Института инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет, e-mail: AMinakov@sfu-kras.ru

Мешкова Виктория Дмитриевна, аспирант, Сибирский федеральный университет, e-mail: redel-vd@yandex.ru

Шарафутдинов Руслан Аглямович, канд. геогр. наук, директор Института экологии и географии Сибирского федерального университета, e-mail: rsharafutdinov@sfu-kras.ru

Захаринский Юрий Николаевич, канд. экон. наук, старший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет, e-mail: y.zakharinskiy@gmail.com

Information about the authors

Sergey A. Filimonov, Candidate of Engineering, Researcher at the Krasnoyarsk branch of IT SB RAS, e-mail: bdk@inbox.ru

Kirill Yu. Litvintsev, Candidate of Physics and Mathematics, Researcher at the Krasnoyarsk branch of IT SB RAS, e-mail: sttupick@yandex.ru

Aleksandr A. Dekterev, Candidate of Engineering, Head of the Krasnoyarsk branch of IT SB RAS, e-mail: dekterev@mail.ru

Andrey V. Minakov, Doctor of Physics and Mathematics, Director of the Institute of Engineering Physics and Radioelectronics, Siberian Federal University, e-mail: AMinakov@sfu-kras.ru

Victoria D. Meshkova, Postgraduate Student at Siberian Federal University, e-mail: redel-vd@yandex.ru

Ruslan A. Sharafutdinov, Candidate of Geography, Director of the Institute of Ecology and Geography at Siberian Federal University, e-mail: rsharafutdinov@sfu-kras.ru

Yuri N. Zakharinskiy, Candidate of Economics, Senior Researcher at Siberian Federal University, e-mail: y.zakharinskiy@gmail.com