






DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-3-285-301

EDN: PLXPYM

УДК 624.15

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Уплотнение снежного основания зимовочного комплекса станции «Восток»

Ф.А. Пашенко , Н.С. Харьков  , А.А. Сидоренко , В.В. Гарбузов 

Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ kharkov_ns@lenair.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 18 апреля 2023 г.

Доработана: 9 июня 2023 г.

Принята к публикации: 12 июня 2023 г.

Для цитирования

Пашенко Ф.А., Харьков Н.С., Сидоренко А.А., Гарбузов В.В. Уплотнение снежного основания зимовочного комплекса станции «Восток» // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 3. С. 285–301. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-3-285-301>

Аннотация. Рассмотрено уплотнение снежного основания строящегося зимовочного комплекса Российской антарктической станции «Восток», потребовавшееся по причине непригодности естественного снежного основания для восприятия нагрузок от опор фундамента зимовочного комплекса. Разработаны технические решения по уплотнению снежного основания на основе прогрева солнечной радиацией с применением термомата и на основе вакуумирования снега. Выполнено расчетное обоснование разработанных технических решений, проведенное на основе пространственных конечно-элементных моделей в рамках вычислительного программного комплекса ANSYS. Для обоснования способа уплотнения снежного основания нагревом солнечной радиацией с применением термомата проанализирован расчетный объем, включающий зону снежного основания, термомат и пространство, заполненное воздухом. При обосновании способа уплотнения снежного основания путем вакуумирования снега изучалась расчетная область для моделирования способа вакуумирования герметичного объема котлована с погруженными колоннами под опорами фундамента зимовочного комплекса. Результаты проведенных расчетных исследований полностью подтвердили предпосылки, заложенные в технических решениях по уплотнению снежного основания зимовочного комплекса на основе применения термомата и на основе применения вакуумирования снега.

Ключевые слова: антарктическая станция «Восток», опоры фундамента, технические решения, термомат, нагрев солнечной радиацией, вакуумирование снега, расчетное обоснование, конечноэлементные модели

Пашенко Федор Александрович, кандидат технических наук, член-корреспондент РАЕН, генеральный директор, Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0009-0001-2947-5291; fedor.p@my.com

Харьков Никита Сергеевич, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по науке, Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7175-0296; kharkov_ns@lenair.ru

Сидоренко Александр Андреевич, кандидат технических наук, руководитель сектора, Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0009-0001-0587-4159; S.idorenko@yandex.ru

Гарбузов Валерий Викторович, главный специалист, Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0009-0000-7871-2604; valeriuzzzz1955@gmail.com

© Пашенко Ф.А., Харьков Н.С., Сидоренко А.А., Гарбузов В.В., 2023

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Compaction of the snow base of Vostok station wintering complex

Fedor A. Pashchenko¹, Nikita S. Kharkov¹, Alexander A. Sidorenko¹, Valery V. Garbuzov¹

Design and Research Institute of Air Transport “Lenaeroproject”, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ kharkov_ns@lenair.ru

Article history

Received: April 18, 2023

Revised: June 9, 2023

Accepted: 12, 2023

For citation

Pashchenko F.A., Kharkov N.S., Sidorenko A.A., Garbuzov V.V. Compaction of the snow base of Vostok station wintering complex. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(3):285–301. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-3-285-301>

Abstract. The compaction of the snow base of the wintering complex under construction of the Russian Antarctic station “Vostok” is considered, which was required due to the unsuitability of the natural snow base for the perception of loads from the supports of the foundation of the wintering complex. Technical solutions were developed for snow base compaction on the basis of heating by solar radiation with the use of thermal mat and on the basis of snow vacuuming. The computational justification of the developed technical solutions was performed, which was carried out based on spatial finite element models using the computational software complex ANSYS. In this case, to substantiate the method of snow base compaction by solar radiation heating with the use of thermal mat, the calculated volume was analyzed, including the snow base zone, thermal mat and the space filled with air. When substantiating the method of snow base compaction by snow vacuuming, there was explored the calculation area for modeling the method of vacuuming for the hermetic volume of the excavation pit with immersed columns under the wintering complex foundation supports. The results of the of the calculated research have fully confirmed the assumptions laid down in the technical solutions for compaction of the wintering complex snow base by using of thermal mat and snow vacuuming.

Keywords: Antarctic station “Vostok”, foundation supports, technical solutions, thermal mat, heating by solar radiation, snow vacuuming, calculation justification, finite elements models

1. Введение

В Антарктиде стартовали строительные-монтажные работы на площадке нового зимовочного комплекса Российской антарктической станции «Восток»¹ [1–3]. После окончания подготовительных работ, начавшихся еще в сезоне 2019–2020 гг., строители установили 36 опор будущей станции (рис. 1).

При этом важнейшая задача заключалась в организации надежного основания опор этого комплекса, учитывая, что естественное снежно-фирновое основание было совершенно не пригодно к восприятию нагрузок от опор фундамента строящегося комплекса вследствие невысокой плотности и прочности снежно-фирновой массы основания [4–11].

Верхний слой естественного снежно-фирнового основания состоит из мелкозернистого снега с размерами зерен 0,2–0,5 мм, ниже расположен среднезернистый снег с размером зерна 0,5–1,5 мм и среднезернистый фирн с размером зерна 1,5–3 мм. Отмечается существенная неоднородность строения снежно-фирнового покрова.

Наибольшую опасность с точки зрения снижения несущей способности снежного покрова представляет крупнозернистый рыхлый фирн рекристаллизационного происхождения (размер зерна 2–3 мм), глубинная изморозь и снег-пльвун при размере зерна 1–3 мм с ярко выраженной вертикальной столбчатой структурой. Такие разновидности фирна расположены, как правило, на границах слоев годового снегонакопления под прослойками льда, радиационными корками и плотным снегом (по данным ВСН 37/76 МГА²).

Fedor A. Pashchenko, PhD, corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences, General Director, Design and Research Institute of Air Transport “Lenaeroproject”, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0009-0001-2947-5291; fedor.p@my.com

Nikita S. Kharkov, PhD, Deputy General Director for Science, Design and Research Institute of Air Transport “Lenaeroproject”, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7175-0296; kharkov_ns@lenair.ru

Alexander A. Sidorenko, PhD, Sector Head, Design and Research Institute of Air Transport “Lenaeroproject”, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0009-0001-0587-4159; s.sidorenko@yandex.ru

Valery V. Garbuzov, Chief Specialist, Design and Research Institute of Air Transport “Lenaeroproject”, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-7871-2604; valeriuzzzz1955@gmail.com

¹ Стратегия развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2030 года. Распоряжение Правительства РФ от 30 июня 2021 г. № 1767-р; *Gendall J.* The coolest architecture on Earth is in Antarctica // *The New York Times*. 2020, January 6.

² ВСН 37/76. Инструкция по проектированию, строительству и оценке эксплуатационной пригодности снежных и снежно-ледовых аэродромов Антарктиды. Ленинград: МГА СССР, 1976. 63 с.

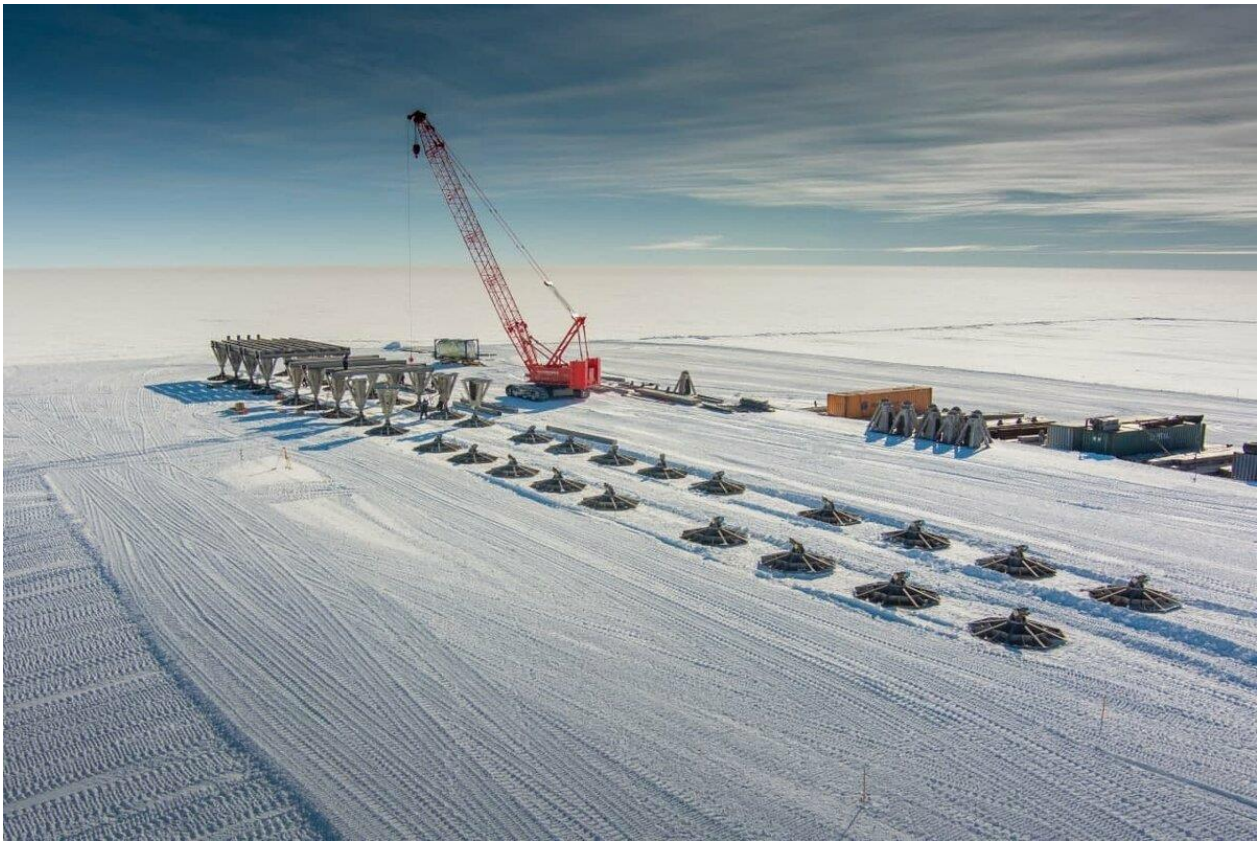


Рис. 1. Расположение плит опор фундамента зимовочного комплекса
(источник: <https://vegchel.ru/index.php?newsid=48008> (дата обращения: 12.02.2023))

Figure 1. Location of the wintering complex foundation slabs
(source <https://vegchel.ru/index.php?newsid=48008> (accessed: 12.02.2023))

Район строительства нового зимовочного комплекса расположен во внутриконтинентальной зоне Антарктиды. Удаленность района от берега создавала значительные трудности при доставке традиционных строительных материалов, необходимых для устройства надежного основания под опоры строящегося комплекса, из-за крайне высокой стоимости грузоперевозок в Антарктиде.

Возникла необходимость разработки современных технических решений для уплотнения существующего основания, используя естественные материалы основания.

В этой связи в АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта „Ленаэропроект“» (ПИиНИИ ВТ «Ленаэропроект») разработаны технические решения по уплотнению снежного (снежно-фирнового) основания для строительства нового зимовочного комплекса Российской антарктической станции «Восток».

При этом учитывались уникальные природно-климатические условия района строительства и в первую очередь самая высокая на планете интенсивность солнечной радиации в районе расположения станции «Восток».

Таким образом, в основу предлагаемых методов возведения снежно-ледовой платформы в основании нового зимовочного комплекса Российской антарктической станции «Восток» легло использование природных факторов и законов физики.

В рамках проведенной в ПИиНИИ ВТ «Ленаэропроект» научно-исследовательской работы были разработаны и обоснованы следующие технические решения для строительства площадки основания из фирнизированного снега в условиях низких температур антарктической станции «Восток»: а) нагрев снежного основания солнечной радиацией с применением термомата; б) вакуумирование герметичных объемов, наполненных неплотным снегом.

2. Материалы и методы

Для проведения расчетного обоснования новых технических решений разрабатывались подходы феноменологического моделирования процессов уплотнения снежного основания. В зависимости от способов уплотнения варианта прилагаемого воздействия применялась соответствующая модель описания

механического поведения снега основания. При этом был учтен зарубежный опыт моделирования снега основания [12; 13].

При тепловом поверхностном воздействии на снег посредством термомата использовалась модель трехфазной фазовой смеси с механизмом межфазного массопереноса. Первая фаза – воздух, занимающий пространство в порах снега. Второй фазой являлся неплотный снег. Малая плотность и способность не осаждаться под действием собственного веса и веса применяемых технических средств моделировались малым значением предельной объемной доли заполнения этой фазой пространства. Третья фаза аналогична по свойствам второй. Отличие заключалось в большей величине предельной объемной доли заполнения пространства снегом.

При механическом способе уплотнения вакуумированием снегонаполненного объема использовалась двухфазная модель снега основания, состоящая из воздуха и гранулированного снега с определенными эффективными свойствами.

Расчетные исследования по обоснованию разработанных технических решений проводились на основе конечноэлементного моделирования в рамках вычислительного программного комплекса ANSYS.

При этом для моделирования процесса повышения температуры снежного основания использовалась модель солнечного теплового излучения, которая позволяла воспроизводить мощность теплового излучения и направление падения солнечных лучей на поверхность исследуемого объекта. В данном случае направление падения лучей задавалось вручную, перпендикулярно поверхности термомата.

Расчеты напряженного состояния снежного основания зимовочного комплекса после его уплотнения различными методами проводились в рамках программного вычислительного комплекса PLAXIS 3D.

3. Результаты и обсуждение

В целях расчетного обоснования разработанного технического решения проводилось численное моделирование способа уплотнения снежного основания зимовочного комплекса путем повышения температуры снежного основания солнечным излучением с использованием термомата³ в рамках вычислительного программного комплекса Ansys Fluent.

Для моделирования рассматриваемого процесса принята расчетная область формы прямоугольной призмы, состоящая из трех частей, представленных на рис. 2. Нижняя часть расчетной области представляет собой зону, заполненную снегом (показана синим цветом). Верхняя часть является пространством, заполненным воздухом. Третья часть, расположенная внутри расчетной области, представляет собой термомат в виде прямоугольной плиты.

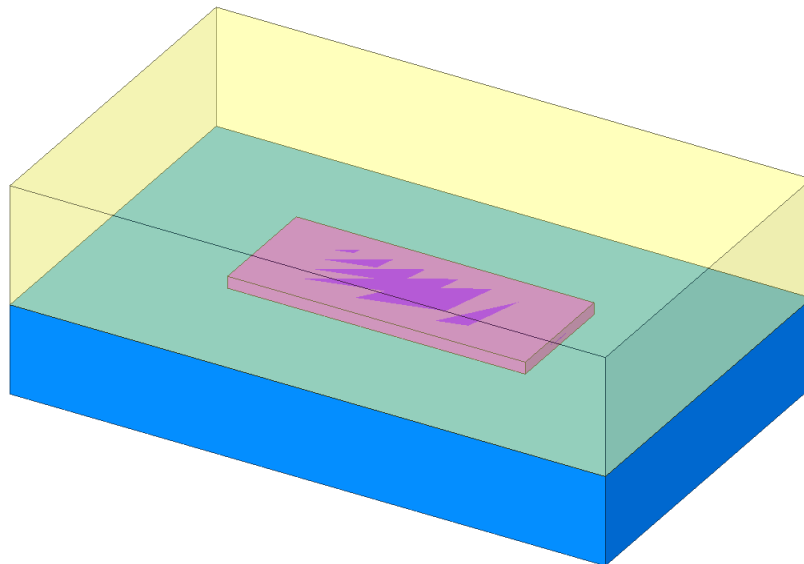


Рис. 2. Расчетная область для расчета повышения температуры снежного основания от воздействия солнечного излучения с применением термомата

Figure 2. The calculation area for calculating the temperature increase of the snow base from solar radiation with the use of a thermal mat

³ Патент РФ № 2721851. Способ уплотнения снежно-ледового покрова / Гарбузов В.В., Харьков Н.С., Пашченко Ф.А.; заявл. 08.10.2019; опублик. 25.05.2020.

На рис. 3 представлен фрагмент конечноэлементной модели расчетной области, включающий термомат.

На внешних границах верхней части расчетной области, соответствующей зоне расположения воздуха, моделировалось свободное втекание/вытекание потока со значением статического давления, равным атмосферному.

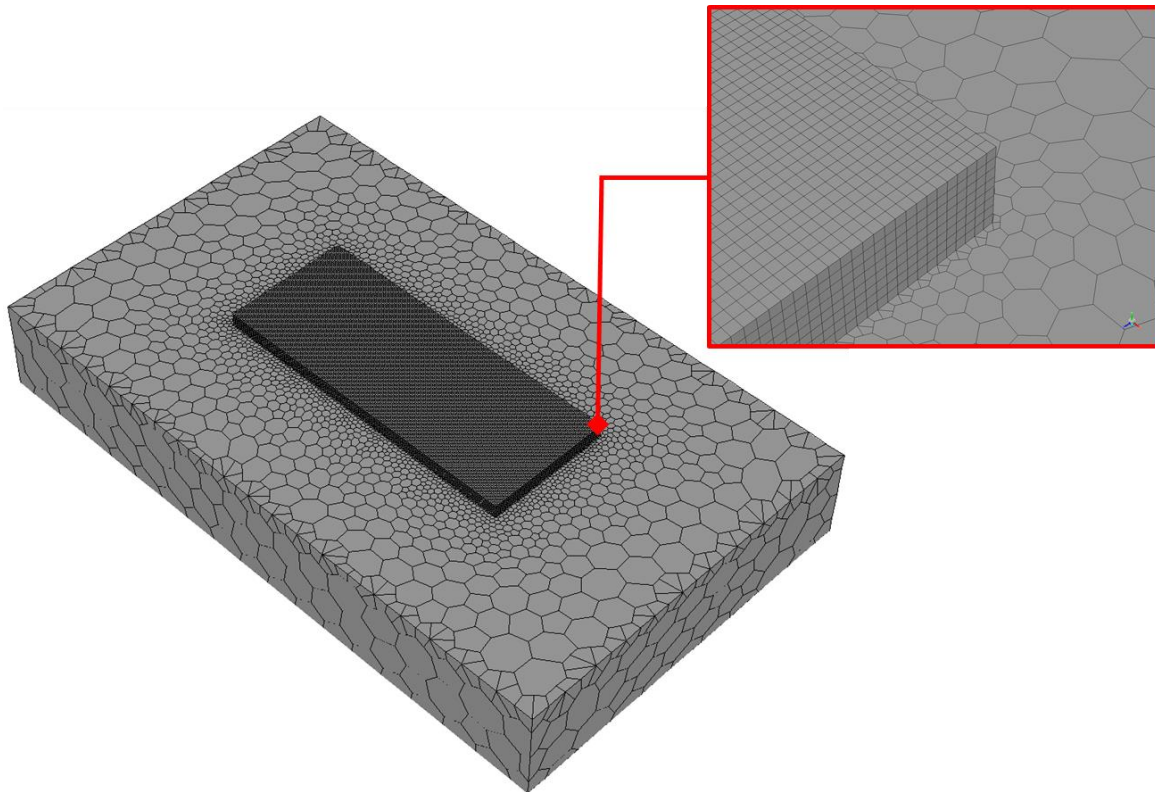


Рис. 3. Фрагмент конечноэлементной модели расчетной области для расчета повышения температуры снежного основания от воздействия солнечной радиации, включающий термомат

Figure 3. A fragment of the finite element model for the calculation area to compute the temperature increase in the snow base from the influence of solar radiation, including thermal mat

Рассматривался подход к моделированию процесса уплотнения снежного основания в результате воздействия поверхностно подводимого тепла. Кристаллические структуры малых масштабов являются каркасной матрицей, которая обеспечивает определенный уровень пористости снега, то есть соотношения объемной доли льда и воздуха, заполняющего поры снега. При температурном воздействии происходит перестроение этой матрицы за счет фазовых переходов и снижение объемной доли воздуха. В результате повышается плотность и несущая способность снежного основания.

Задача температурного воздействия термомата на прилегающий слой снега ставилась следующим образом. Начальное распределение фазы плотного снега соответствовало значению объемной доли 0,1. Для фазы неплотного снега задавалось значение 0,2. Суммарное значение обеих фаз равнялось 0,3. Соответствующие графики представлены на рис. 4.

В результате теплового воздействия происходит межфазный массоперенос, и фаза неплотного снега переходит в фазу плотного снега, для которой установлено большее значение предела объемного заполнения. Это дает возможность фазе плотного снега увеличить свою объемную долю в результате осаждения в поле силы тяжести. Результат локального массопереноса между двумя фазами снега представлен на графиках распределения объемных долей в направлении, перпендикулярном к плоскости подошвы термомата (рис. 4). Расстояние отсчитывается перпендикулярно вниз от плоскости подошвы термомата.

Вблизи термомата реализуется полный переход фазы неплотного снега в фазу плотного снега, которая обеспечивает объемную долю выше 0,4. Слой, в котором происходит эффективное замещение одной фазы на другую, имеет толщину примерно 0,1 м. На большем расстоянии от термомата воздействие температуры ослабевает и имеет место буферная зона, где отмечается примерно равное значение объемных долей фаз.

На расстоянии 0,25 м и далее от термомата межфазный массоперенос полностью останавливается ввиду низкой температуры, а распределение фаз соответствует изначально заданному.

Перераспределение фаз в пространстве вблизи термомата дает повышение эффективной плотности снега, которая складывается из плотности фазы неплотного снега и фазы плотного снега. Распределение эффективной плотности представлено на рис. 5.

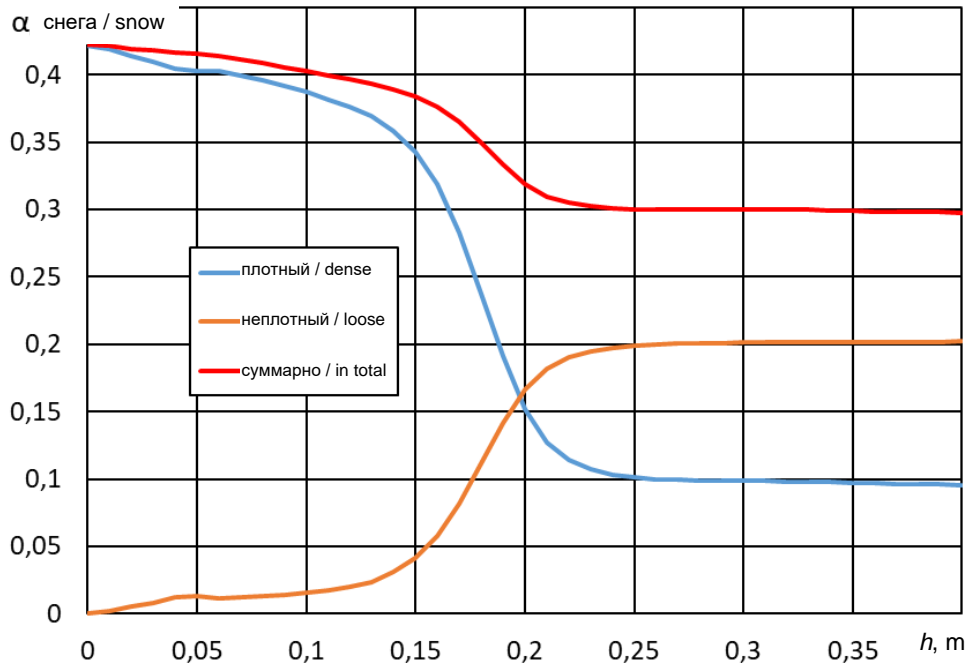


Рис. 4. Распределение объемной доли фазы, моделирующей плотный снег, неплотный снег и их суммарное значение в направлении перпендикулярном к плоскости подошвы термомата

Figure 4. Distribution of the volume fraction of the phase modeling the dense snow, loose snow and their total value in the direction which is orthogonal to the thermal mat bottom plane

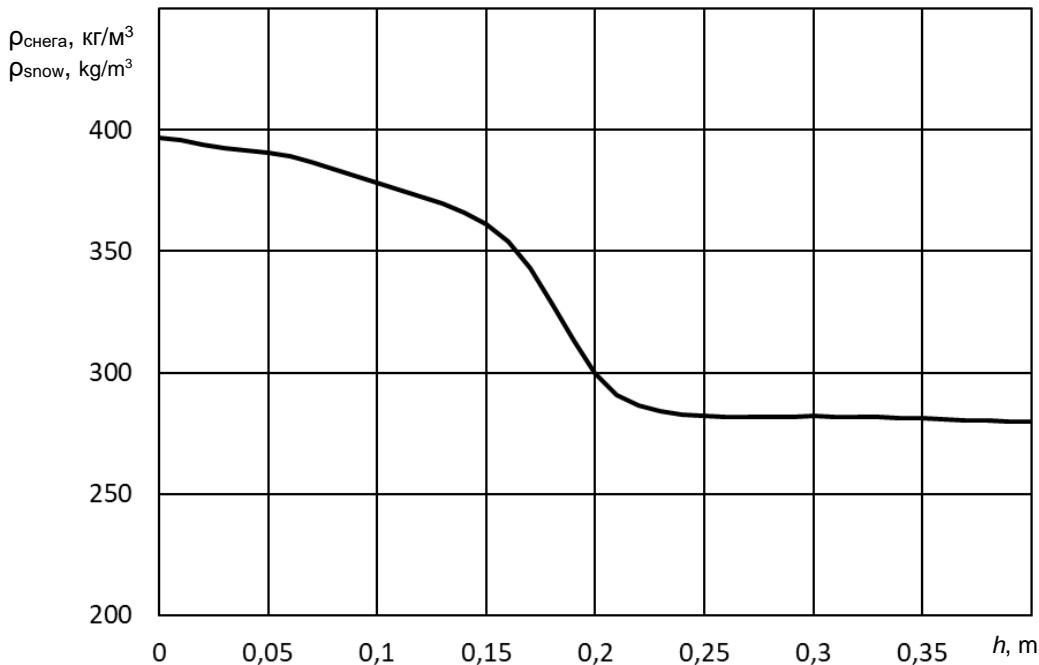


Рис. 5. Распределение плотности снега в направлении перпендикулярном к плоскости подошвы термомата

Figure 5. The distribution of snow density in the direction orthogonal to the thermal mat bottom plane

Таким образом, даже при отрицательной температуре в условиях ее повышения происходит уплотнение снега основания под термоматом.

Распределение температуры в центральном поперечном сечении расчетной области (проходящем по центру термомата) представлено на рис. 6. Полученные результаты свидетельствуют о наличии краевых эффектов и неоднородности температурного поля для периферийной области термомата. В центральной его части значения температуры остаются постоянными, что обеспечит равномерный характер уплотнения снега в прилегающем к термомату слою снежного основания.

Для более подробного анализа картины распределения температуры в расчетном объеме намечены три расчетных сечения: 1 – по центру термомата; 2 – по торцу термомата; 3 – на удалении, равном половине длины термомата. Расположение контрольных сечений в расчетном объеме представлено на рис. 7.

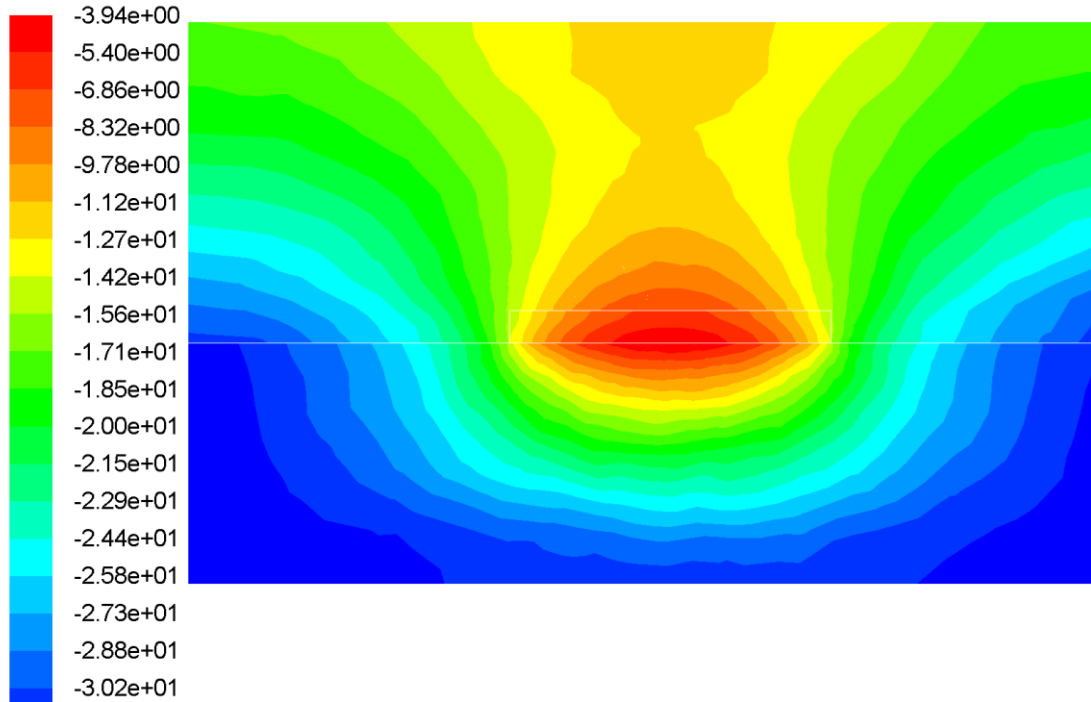


Рис. 6. Распределение температуры в поперечном сечении расчетной области, проходящем по центру термомата
Figure 6. Distribution of temperature in the cross section of the calculation area, passing through the center of the thermal mat

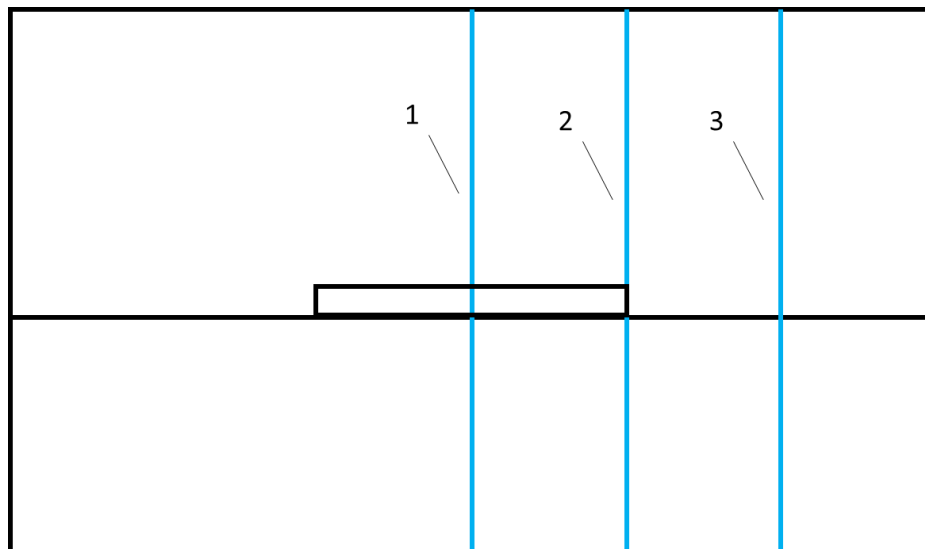


Рис. 7. Расположение контрольных сечений (1, 2, 3) в расчетном объеме
Figure 7. Location of control sections (1, 2, 3) in the calculated volume

Графики распределения температуры в контрольных сечениях расчетного объема представлены на рис. 8.

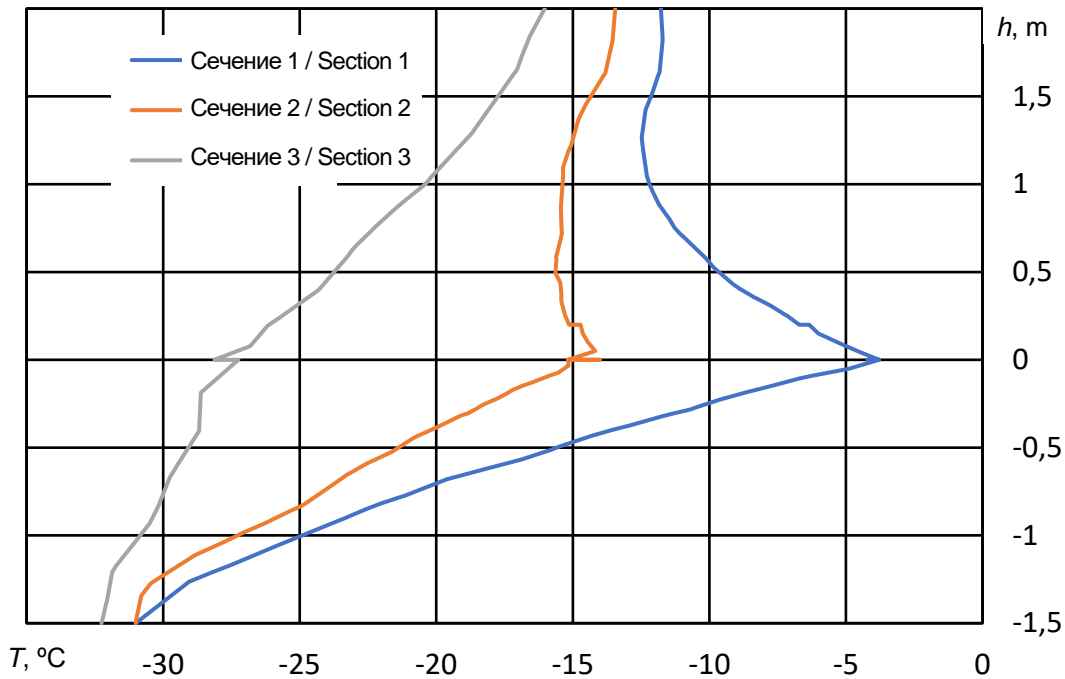


Рис. 8. Распределение температуры в контрольных сечениях расчетного объема (за нулевую отметку принята отметка подошвы термомата)
Figure 8. Temperature distribution in the control sections of the calculated volume (the bottom of the thermal mat is taken as the zero level)

Полученные результаты подтверждают предпосылки, заложенные в техническом решении по уплотнению снежного основания с применением термомата.

Также выполнялось расчетное обоснование другого способа уплотнения снега основания посредством механического воздействия путем вакуумирования герметичных объемов, наполненных неплотным снегом⁴. Вакуум, создаваемый путем откачки воздуха из этих объемов, создает перепад давления на внутренней и внешней поверхностях стенок герметичного объема.

Избыточное наружное давление через стенки герметичного объема передается на прилегающий к стенкам слой снега, который сжимается и уплотняется. Уплотнившийся снег во внешнем слое начинает воздействовать на внутренние слои. Таким образом, постепенно уплотнение снега происходит по всей глубине объема уплотняемого неплотного снега. Высвобождающийся при уплотнении снега воздух удаляется в ходе дальнейшего вакуумирования.

В процессе разработки методики численного моделирования уплотнения снега механическим воздействием за счет вакуумирования герметичных объемов (с последующей реализацией в рамках программного комплекса ANSYS) изучались три варианта постановки задачи. В первом варианте рассматривались двумерные плоские конфигурации герметичных объемов (рис. 9). Второй и третий варианты представляли собой пространственные постановки задачи, где рассматривались небольшой объем (ячейка) формы прямоугольной призмы и объем, сопоставимый по размерам с котлованом, соответственно.

В качестве примера, наиболее полно иллюстрирующего процесс вакуумирования, выполнены расчеты конструкции герметичного объема котлована размером в плане 4×6 м и глубиной 3 м с массивом погруженных колонн (рис. 10).

Колонны длиной 2,2 м и диаметром 0,4 м имели перфорированные стены с демпфирующим пористым слоем для исключения выноса снежной массы из котлована. Поперечный разрез по осям двух колонн представлен на рис. 11.

Величина создаваемого вакуума (пониженного давления) составляла 0,5 атм.

⁴ Патент РФ № 2714406. Способ вакуумного уплотнения основания строительной конструкции / Гарбузов В.В., Харьков Н.С., Пашченко Ф.А.; заявл. 08.10.2019; опубл. 14.02.2020.

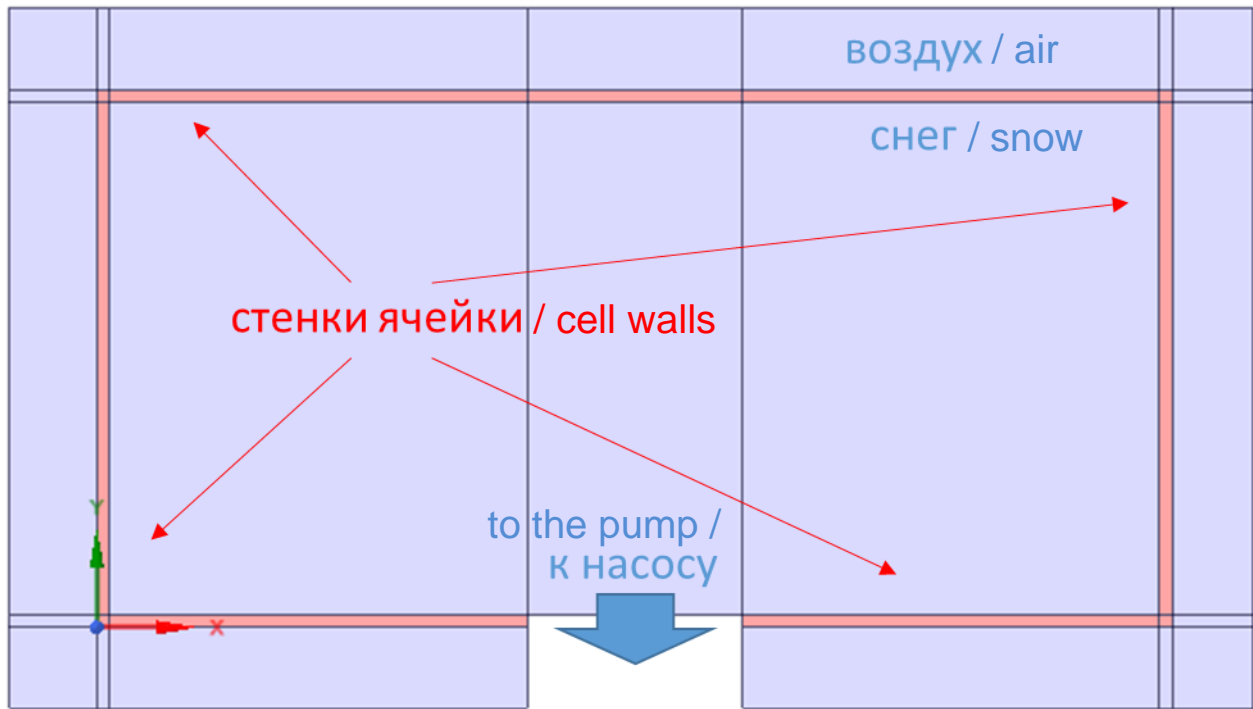


Рис. 9. Конфигурация расчетной области для плоской постановки задачи
Figure 9. Configuration of the computational area for the planar formulation of the problem

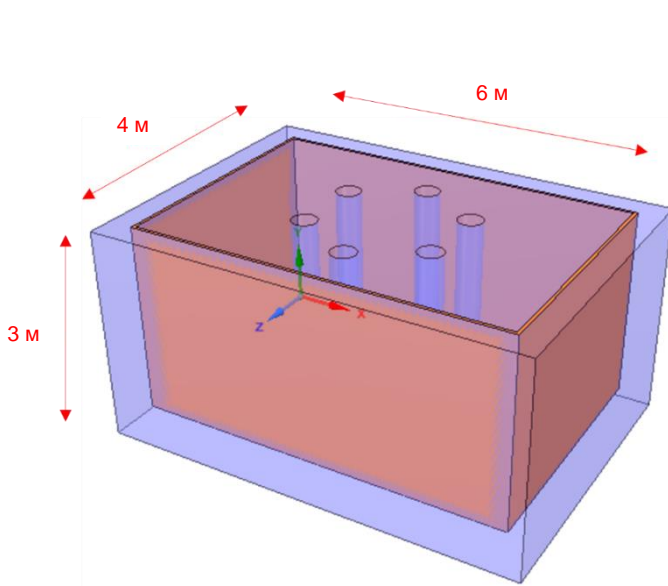


Рис. 10. Расчетная область для моделирования способа вакуумирования герметичного объема котлована
Figure 10. Calculation area for modeling the way of vacuuming for hermetic excavation pit volume

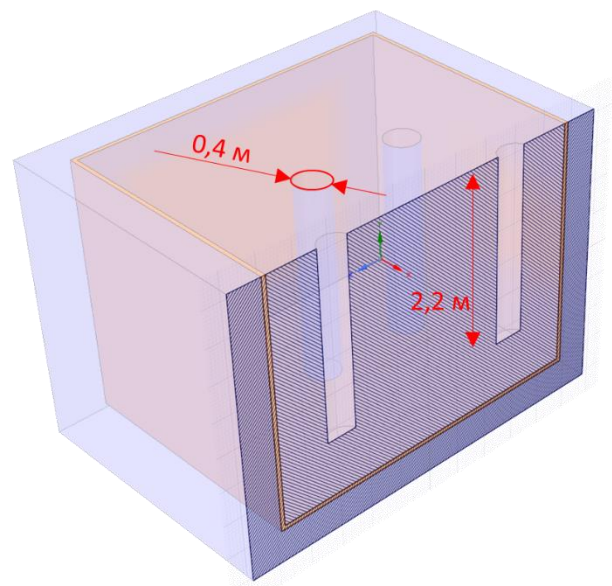


Рис. 11. Поперечный разрез по осям двух погруженных колонн расчетной области для моделирования способа вакуумирования герметичного объема котлована
Figure 11. Cross section along the axes of two immersed columns of the computational area for modeling the method of vacuuming for hermetic volume of excavation pit

Результаты расчетов в виде перемещений конструкции герметичного котлована с массивом погруженных колонн, м, представлены на рис. 12.

Картина распределения давления, Па, во внутреннем и наружной объемах в поперечном разрезе по осям двух погруженных колонн представлена на рис. 13.

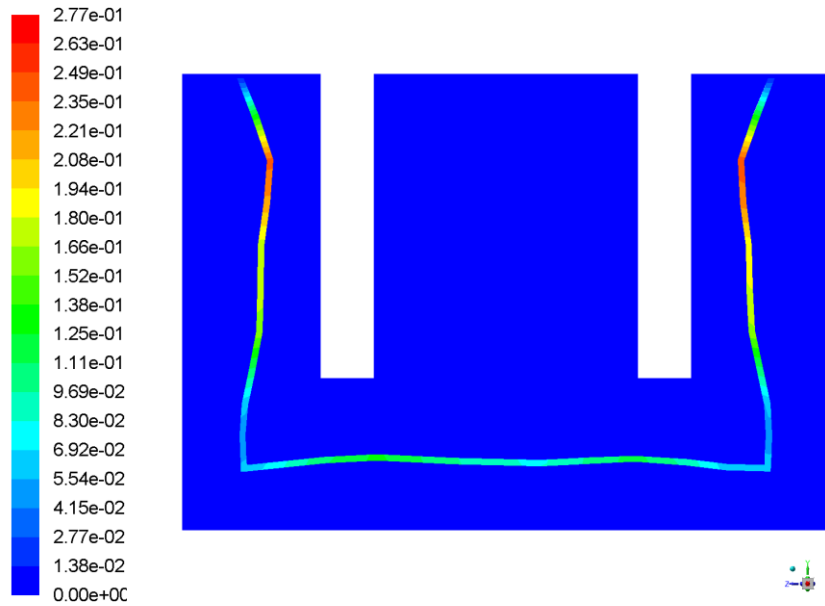


Рис. 12. Перемещения, м, в оболочке герметичного объема в поперечном разрезе по осям двух погруженных колонн
Figure 12. Displacements, m, in the shell of a hermetic volume in the cross section along the axes of two immersed columns

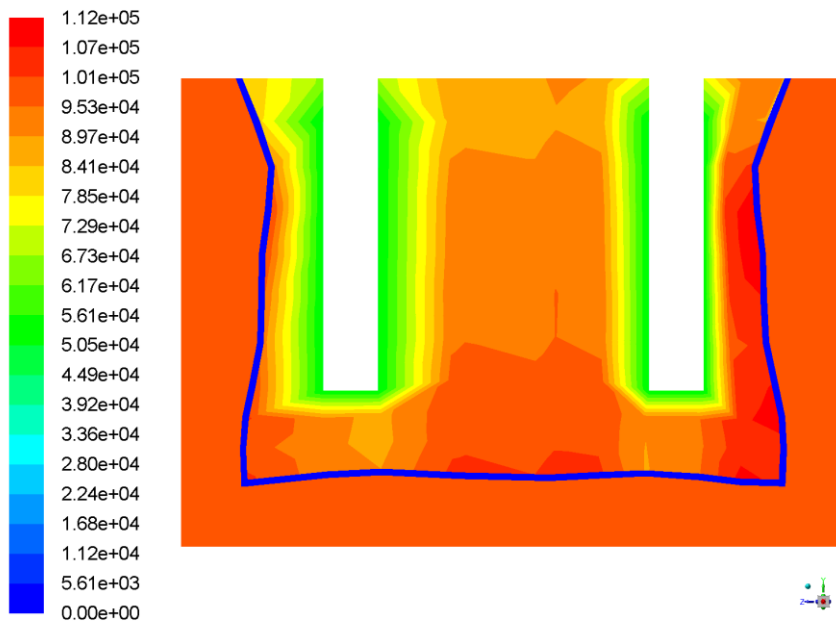


Рис. 13. Распределение давления, Па, во внутреннем и наружном объемах в поперечном разрезе по осям двух погруженных колонн
Figure 13. Pressure distribution, Pa, in the inner and outer volumes in the cross section along the axes of two immersed columns

Распределение плотности снежной фазы во внутреннем и наружном объемах представлено графически на рис. 14 в поперечном разрезе по осям двух погруженных колонн.

Уплотнение снежного основания путем вакуумирования обеспечивает повышение плотности снега до уровня 400 кг/м^3 как для случая небольшого объема (ячейка), так и для большого объема (котлован).

Представленные результаты расчетов подтверждают предпосылки, заложенные в техническом решении по уплотнению снежного основания с применением вакуумирования герметичных объемов, наполненных неплотным снегом.

Для оценки эффективности разработанных способов уплотнения снежного основания выполнено определение напряженного состояния в снежном основании нового зимовочного комплекса станции «Восток».

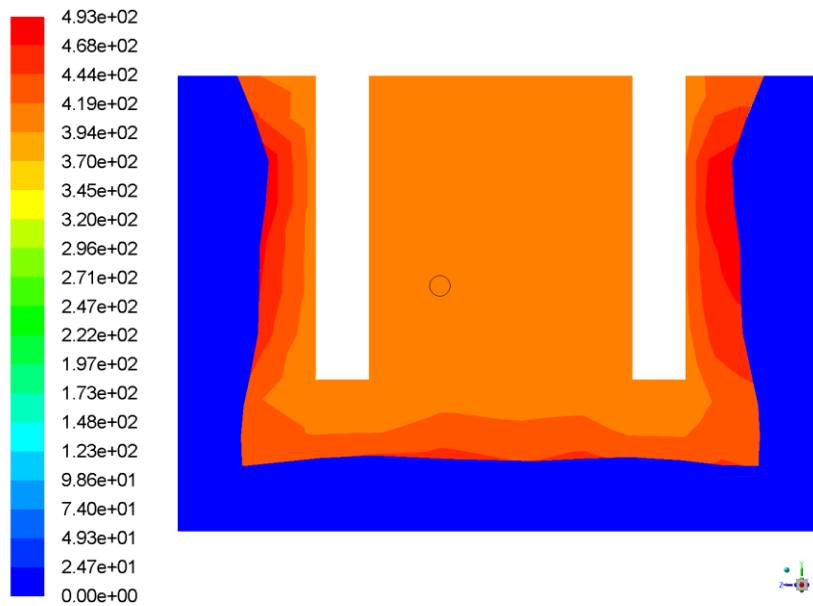


Рис. 14. Распределение плотности снежной фазы, kg/m^3 , во внутреннем и наружном объеме в поперечном разрезе по осям двух погруженных колонн

Figure 14. Distribution of snow phase density, kg/m^3 , in the inner and outer volume in the cross section along the axes of two immersed columns

Моделирование напряженного состояния снежного основания зимовочного комплекса под действием постоянной нагрузки от опор фундамента зимовочного комплекса

Расчеты напряженного состояния снежного основания зимовочного комплекса на действие нагрузки от опор фундамента зимовочного комплекса проводились в рамках программного комплекса PLAXIS 3D. Рассматривались четыре варианта снежного основания. Первый вариант – естественное снежное основание. Второй – устройство монолитной ледовой плиты с размерами в плане 11×11 м на глубину 1 м. Третий и четвертый варианты – устройство сборного основания из уплотненного снега с размерами в плане 6×6 м общей мощностью 1 и 1,5 м соответственно. В качестве расчетной области рассматривался участок основания глубиной 10 м, с расширенными границами на 5 м от опорной плиты фундамента зимовочного комплекса.

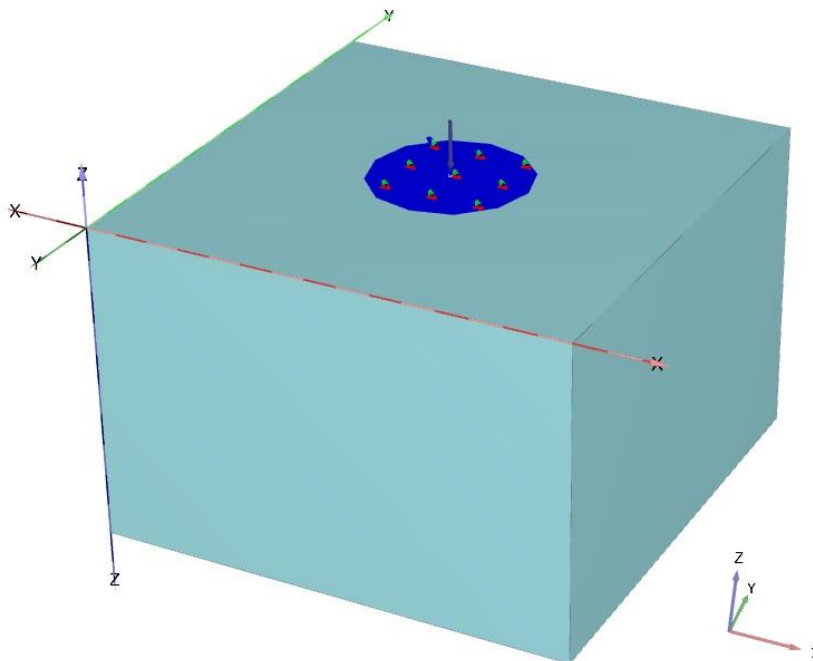


Рис. 15. Вид расчетной области снежного основания
Figure 15. View of the calculated area of the snow base

Виды расчетной области и конечноэлементной модели участка снежного основания представлены на рис. 15 и 16.

Для расчетов напряженного состояния снежного основания принимались следующие исходные данные. Металлическая конструкция опорной плиты фундамента зимовочного комплекса высотой 0,3 м представляет собой сетку, покрытую стальной пластиной сверху (рис. 17). Материал конструкции – сталь 03X17H14M3 с модулем упругости 210 000 МПа.

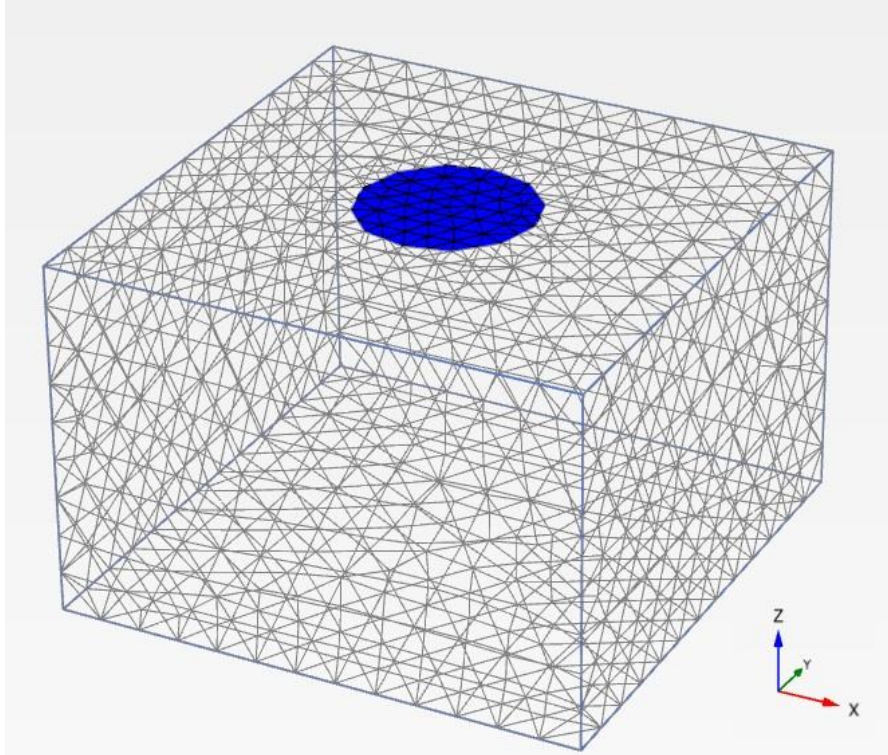


Рис. 16. Конечноэлементная модель расчетной области снежного основания
Figure 16. Finite element model of the calculated area of the snow base

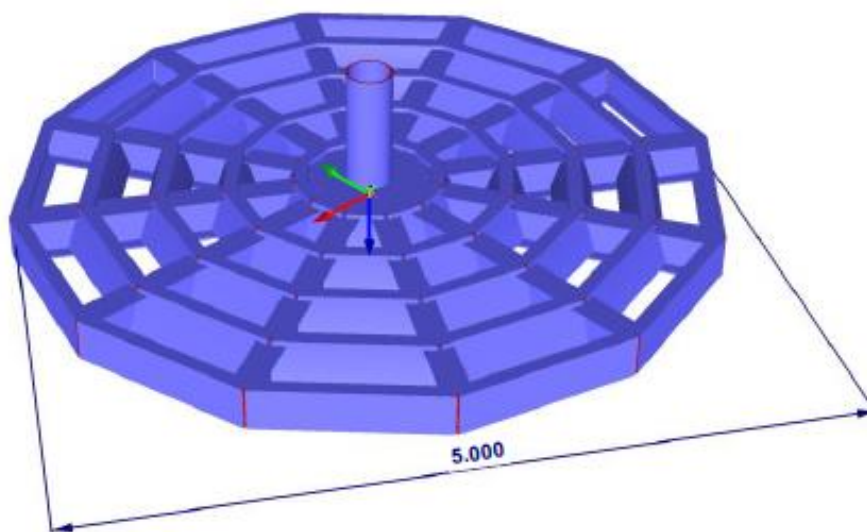


Рис. 17. Металлическая конструкция опорной плиты фундамента зимовочного комплекса
Figure 17. Metal structure of the foundation supporting slab of the wintering complex

Физико-механические свойства снежного основания

При определении физико-механических свойств снежного основания учитывались данные, представленные в [14–22].

Значения плотности снежно-фирнового основания переменны по глубине. Характерная зависимость гарантированной плотности по глубине основания представлена на рис. 18.

Зависимость модуля упругости снега основания от его плотности представлена на рис. 19.

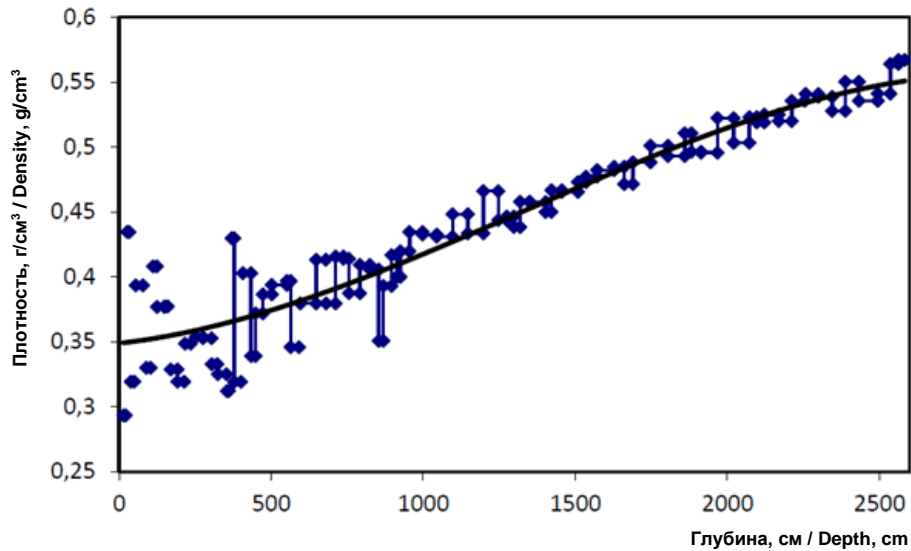


Рис. 18. Зависимость гарантированной плотности снега по глубине снежного основания
Figure 18. Dependence of the guaranteed snow density on the depth of the snow base

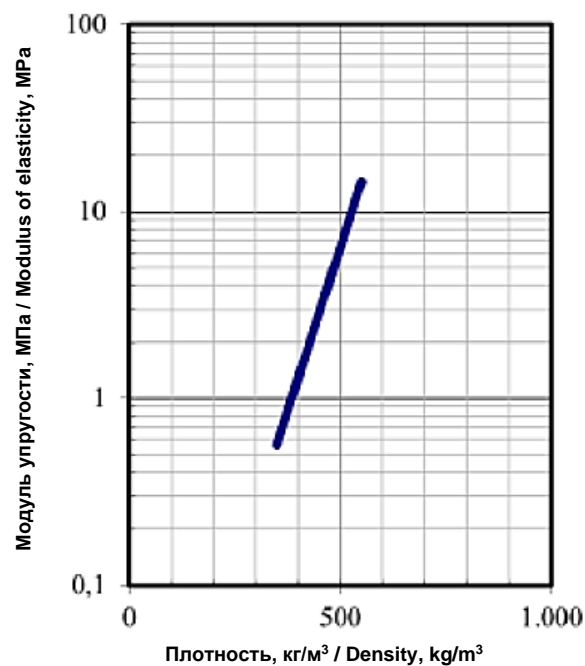


Рис. 19. Зависимость модуля упругости снега основания, МПа, от его плотности
Figure 19. Dependence of the snow base's modulus of elasticity, МПа, on its density

В расчетах принимались следующие физико-механические свойства льда [23–25]:

- плотность 900 кг/м^3 ;
- модуль упругости 5000 МПа ;
- коэффициент Пуассона $0,34$.

Максимальная расчетная вертикальная нагрузка на опорную плиту фундамента зимовочного комплекса составляет 1280 кН.

В ходе расчетов напряженного состояния снежного основания получены результаты, представленные в табл. 1. Важнейшим показателем напряженного состояния снежного основания строящегося зимовочного комплекса являются вертикальные (а также – главные) напряжения в снежном основании.

В табл. 1 сведены данные о вертикальных напряжениях (давлении) в снежном основании под опорами фундамента зимовочного комплекса.

Таблица 1

Активное вертикальное давление в снежном основании, кПа

| Глубина от низа подошвы опорной плиты фундамента, м | Вариант 1 | Вариант 2 | Вариант 3 | Вариант 4 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,0 | 142 | 458 | 739 | 739 |
| 1,0 | 45 | 13 | 23,1 | – |
| 1,5 | 37 | – | – | 19,8 |
| 2,0 | 33 | – | – | – |

Table 1

Active vertical pressure in the snow base, kPa

| Depth from the bottom of the foundation supporting slab, m | Option 1 | Option 2 | Option 3 | Option 4 |
|--|----------|----------|----------|----------|
| 0.0 | 142 | 458 | 739 | 739 |
| 1.0 | 45 | 13 | 23.1 | – |
| 1.5 | 37 | – | – | 19.8 |
| 2.0 | 33 | – | – | – |

Анализ результатов расчетов напряженного состояния для варианта 1 снежного основания показал, что при сохранении естественного основания образуются контактные напряжения по периметру опоры фундамента, которые достигают 142 кПа. Эпюра вертикального давления выравняется по площади на глубине 1 м и составляет 45 кПа.

Рассматривая вариант 2 уплотнения снежного основания, можно отметить, что ледовое основание выступило в роли жесткой плиты, которая перераспределила напряжения равномерно по всей площади до величины 13 кПа. Контактные напряжения практически отсутствуют. Однако появляется дополнительное требование по прочности ледового основания на поверхности контакта под стойкой опоры до величины не менее 458 кПа.

Распределение вертикальных напряжений для вариантов 3 и 4 уплотнения снежного основания аналогично результатам для варианта 2. Меньшая площадь жесткого основания по сравнению с вариантом 2 привела к увеличению напряжений на поверхности основания до 739 кПа, а также к более длительному затуханию напряжений по глубине основания практически в 2 раза. Увеличение толщины сборного основания с 1 м (вариант 3) до 1,5 м (вариант 4) уменьшило напряжения под подошвой опоры на 15 %.

Относительные величины (в процентах) вертикального давления по глубине основания в сравнении с естественным основанием (вариант 1) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Относительное изменение вертикальных напряжений в снежном основании

| Вариант 1 | Вариант 2 | Вариант 3 | Вариант 4 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 100 % | 29 % | 51 % | 53 % |

Table 2

Relative change of vertical stresses in the snow base

| Option 1 | Option 2 | Option 3 | Option 4 |
|----------|----------|----------|----------|
| 100% | 29% | 51% | 53% |

Анализ полученных результатов расчетов показал, что наиболее эффективным способом уменьшения вертикальных напряжений под подошвой опоры фундамента зимовочного комплекса является устройство ледовой плиты (вариант 2), что снижает вертикальные напряжения в 3 раза (по сравнению с вариантом 1). Варианты 3 и 4 снижают вертикальные напряжения в основании только в 2 раза (по сравнению с вариантом 1).

Определение прочности снежного основания

Для оценки полученных результатов расчетов напряженного состояния снежного основания в результате применения разработанных способов его уплотнения потребовалось определение прочности снежного основания. В соответствии с разработками, приведенными в [4; 23; 25], и положениями ВСН37-76 МГА «Инструкция по проектированию, строительству и оценке эксплуатационной пригодности снежных и снежно-ледовых аэродромов Антарктиды»² предельное сопротивление снега сжатию можно выразить графически в виде зависимости от его плотности (рис. 20), а также по аналитической зависимости вида

$$R_{\text{расч}} = R_0 \cdot K_t \cdot K_0, \quad (1)$$

где R_0 – прочность снега при сжатии при $t = -100$ °С, кПа; K_t – коэффициент, учитывающий температуру снега и снегольда (для $t = -13,2$ °С принимается 1,13); K_0 – коэффициент, учитывающий изменчивость и неоднородность свойств снежно-фирнового покрова в Антарктиде (принимается 0,3).

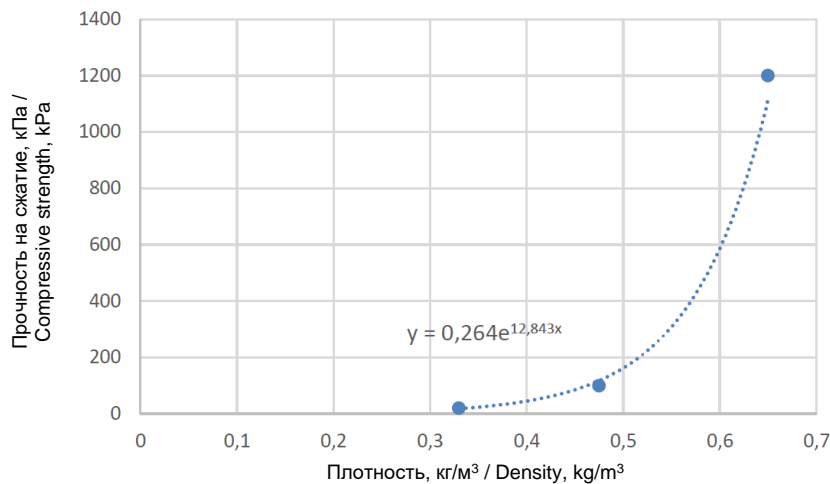


Рис. 20. Зависимость прочности снега основания на сжатие от его плотности при $t = -100$
Figure 20. Dependence of the compressive strength of the snow base on its density at $t = -100$

Результаты определения прочности снега основания по его глубине в сравнении с давлением в основании для различных вариантов его уплотнения представлены в табл. 3.

В соответствии с полученными результатами (табл. 3) можно отметить, что без проведения мероприятий по уплотнению снежного основания надежность зимовочного комплекса не будет обеспечена. Наиболее эффективным представляются варианты 2 и 4 уплотнения снежного основания.

Таблица 3

Сопротивление снежного основания при сжатии, кПа, в сравнении с давлением в основании для различных вариантов его уплотнения

| Глубина от низа подошвы опорной плиты, м | Расчетное сопротивление снега основания сжатию $R_{\text{расч}}$, кПа | Вариант 1 | Вариант 2 | Вариант 3 | Вариант 4 |
|--|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,0 | 4,2 | 142 | – | – | – |
| 1,0 | 14,1 | 45 | 13 | 23,1 | – |
| 1,5 | 31,2 | 37 | – | – | 19,8 |
| 2,0 | 52,7 | 33 | – | – | – |

Table 3

**Resistance of the snow base under compression, kPa,
in comparison with the pressure in the base for various options of its compaction**

| Depth from the bottom of the supporting slab, m | The calculated resistance of the snow base to compression R_c , kPa | Option 1 | Option 2 | Option 3 | Option 4 |
|---|---|----------|----------|----------|----------|
| 0.0 | 4.2 | 142 | – | – | – |
| 1.0 | 14.1 | 45 | 13 | 23.1 | – |
| 1.5 | 31.2 | 37 | – | – | 19.8 |
| 2.0 | 52.7 | 33 | – | – | – |

4. Заключение

1. Важнейшая задача при подготовке строительства нового зимовочного комплекса антарктической станции «Восток» заключалась в организации надежного основания опор фундамента зимовочного комплекса, учитывая, что естественное снежно-фирновое основание было совершенно не пригодно к восприятию нагрузок от опор фундамента строящегося комплекса.

2. В рамках проведенной в ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект» научно-исследовательской работы разработаны технические решения по уплотнению снежного основания из фирнизированного снега при подготовке площадки для строительства зимовочного комплекса антарктической станции «Восток» в условиях низкой температуры с использованием повышения температуры от солнечной радиации на основе применения термоматов и с использованием вакуумирования снега основания.

Наиболее эффективным представляется комбинированный способ уплотнения снежного основания, сочетающий использование повышения температуры от солнечной радиации на основе применения термоматов и использование вакуумирования снега основания.

3. Выполнено расчетное обоснование разработанных технических решений по уплотнению снежного основания зимовочного комплекса на основе конечноэлементных моделей в рамках вычислительно-программного комплекса ANSYS.

4. Уплотнение снежного основания путем вакуумирования обеспечивает повышение плотности снега до уровня 400 кг/м^3 как для случая небольшого объема (ячейка), так и для большого объема (котлован).

5. Расчетные исследования напряженного состояния уплотняемого снежного основания, вызванного нагрузками от опор фундамента зимовочного комплекса, показали, что устройство опор фундамента зимовочного комплекса антарктической станции на естественном снежном основании без дополнительных мер по уплотнению основания не обеспечивает надежность сооружения.

6. Устройство под опорами фундамента зимовочного комплекса уплотнения из ледовой плиты размерами 11×11 м и толщиной 1,0 м снижает вертикальную составляющую напряжений в снежном основании в 3 раза (по сравнению с естественным снежным основанием), что не превышает расчетное сопротивление снега основания.

7. Устройство сборного основания из уплотненного снега размерами в плане 6×6 м и мощностью 1,5 м снижает вертикальные активные напряжения в снежном основании в 2 раза (по сравнению с естественным снежным основанием), что не превышает расчетное сопротивление снега основания.

Список литературы / References

1. Puntus V.A., Myasepp K.K. Conceptual designing of housing for the Arctic and Antarctic. *Housing Construction*. 2015;(1):12–17. (In Russ.)

Пунтус В.А., Мясепп К.К. Концептуальное проектирование жилища для Арктики и Антарктиды // Жилищное строительство. 2015. № 1. С. 12–17.

2. Puntus V.A., Myasepp K.K., Filin P.A., Loktik O.G. *Recent trends and research of the Arctic and Antarctic in the field of urban development. 200 years of the discovery of Antarctica*. St. Petersburg; 2019. (In Russ.)

Пунтус В.А., Мясепп К.К., Филин П.А., Локтик О.Г. Последние тенденции и исследования Арктики и Антарктики в области градостроительного освоения. 200 лет открытия Антарктиды. СПб., 2019. 121 с.

3. Zhuravel V. 200th anniversary of the discovery of Antarctica: a breakthrough in scientific research is needed. *Contemporary Europe*. 2020;(7):207–217. (In Russ.) <http://doi.org/10.15211/soveurope72020227237>

Журавель В.П. 200-летие открытия Антарктиды: необходим прорыв в отечественных научных исследованиях // Современная Европа. 2020. № 7 (100). С. 207–217. <http://doi.org/10.15211/soveurope72020227237>

4. Polyakov S.P., Ivanov B.V., Klepikov A.V., Klokov V.D., Lukin V.V., Marfyanov V.L. Physical and mechanical properties of snow-firn cover of the Vostok station air strip, Antarctica. *Ice and Snow*. 2010;(1):119–122. (In Russ.)

- Поляков С.П., Иванов Б.В., Клепиков А.В., Клоков В.Д., Лукин В.В., Мартыанов В.Л. Физико-механические свойства снежно-фирнового покрытия взлетно-посадочной полосы на станции Восток в Антарктиде // Лед и снег. 2010. № 1. С. 119–122.
5. Klyuchnikov G. Creation of high-strength snow airfields in the Arctic and Antarctic. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2006;(3):34–36. (In Russ.)
- Ключников Г. Создание высокопрочных снежных аэродромов в Арктике и Антарктике // Транспорт Российской Федерации. 2006. № 3. С. 34–36.
6. Anikin A.A., Barakhtanov L.V., Donato I.O. Physico-mechanical properties of snow as a trackbed when moving cars. *Science and Education of Bauman MSTU*. 2010;(10):1–8. (In Russ.)
- Аникин А.А., Баракханов Л.В., Донато И.О. Физико-механические свойства снега как полотна пути при движении машин // Наука и образование: научное издание МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2010. № 10. С. 1–8.
7. Takahashi S. Characteristics of drifting snow at Mizuho station, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 1985;6:71–75. <https://doi.org/10.1017/S0260305500010028>
8. Massom R.A., Eicken H., Haas C., Jeffries M.O., Drinkwater M.R., Sturm M., Worby A.P., Wu X., Lytle V.I., Ushio Sh., Morris K., Reid P.A., Warren S.G., Allison I. Snow on Antarctic sea ice. *Reviews of Geophysics*. 2001;39(3):413–445. <https://doi.org/10.1029/2000RG000085>
9. Yirmibesoglu S., Oktar O., Ozsoy B. Review of scientific research conducted in Horseshoe island where potential place for Turkish Antarctic base. *International Journal of Environment and Geoinformatics*. 2022;9(4):11–23. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.1018913>
10. Salamatin A.N., Lipenkov V.Ya., Barnola J.M., Hori A., Duval P., Hondoh T. Snow/firn densification in Polar ice sheets. *Physics of Ice Core Records II: Papers Collected after the 2nd International Workshop on Physics of Ice Core Records, held in Sapporo, Japan, 2–6 February 2007*. Hokkaido University; 2007. p. 195–222. <http://hdl.handle.net/2115/45449>
11. Sayers C.M. Porosity dependence of elastic moduli of snow and firn. *Journal of Glaciology*. 2021;67(265):788–796. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.25>
12. Banfi F., De Michele C. A local model of snow-firn dynamics and application to the Colle Gnifetti site. *The Cryosphere*. 2020;16:1031–1056. <https://doi.org/10.5194/tc-16-1031-2022>
13. De Michele C., Avanzi F., Ghezzi A., Jommi C. Investigating the dynamics of bulk snow density in dry and wet conditions using a one-dimensional model. *The Cryosphere*. 2013;7:433–444. <https://doi.org/10.5194/tc-7-433-2013>
14. Benassai S., Becagli S., Gragnani R., Magand O., Proposito M., Fattori I., Traversi R., Udisti R. Sea-spray deposition in Antarctic coastal and plateau areas from ITASE traverses. *Annals of Glaciology*. 2005;4:32–40. <https://doi.org/10.3189/172756405781813285>
15. Song M., Baker I., Cole D.M. The effect of particles on dynamic recrystallization and fabric development of granular ice during creep. *Journal of Glaciology*. 2005;51(174):377–382. <https://doi.org/10.3189/172756505781829287>
16. Gow A.J., Veese D. Physical properties, crystal line textures and c-axis fabrics of the Siple Dome (Antarctica) ice core. *Journal of Glaciology*. 2007;53(183):573–584. <https://doi.org/10.3189/002214307784409252>
17. Hamann L., Weikusat C., Azuma N., Kipfshuhl S. Evolution of ice crystal microstructure during creep experiments. *Journal of Glaciology*. 2007;53(182):479–589. <https://doi.org/10.3189/002214307783258341>
18. Matsuoka K., Uratsuka S., Fujita S., Nishio F. Ice flow-induced scattering zone within the Antarctic ice sheet revealed by high-frequency airborne radar. *Journal of Glaciology*. 2004;50(170):382–388. <https://doi.org/10.3189/172756504781829891>
19. Veres A.N., Ekaykin A.A., Golobokova L.P., Khodzher T.V., Khuriganowa O.I., Turkeev A.V. A record of volcanic eruptions over the past 2,200 years from Vostok firn cores, central East Antarctica. *Frontiers in Earth Science*. 2023;11:1–12. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1075739>
20. Polyakova E.V. Defining and applying a new approximation for the parametric probability densities of spherical particle profile sizes. *Image Analysis Stereology*. 2022;41(1):1–5. <https://doi.org/10.5566/ias.2539>
21. Ekaykin A.A., Bolshunov A.V., Lipenkov V.Ya., Scheinert M., Eberlein L., Brovko E., Popov S.V., Turkeev A.V. First glaciological investigations at Ridge B, central East Antarctica. *Antarctic Science*. 2021;33(4):418–427. <https://doi.org/10.1017/S0954102021000171>
22. Turkeev A.V., Vasiliev N.I., Lipenkov V.Ya., Bolshunov A.V., Ekaykin A.A., Dmitriev A.N., Vasiliev D.A. Drilling the new 5G-5 branch hole at Vostok Station for collecting a replicate core of old meteoric ice. *Annals of Glaciology*. 2021;62(85–86):305–310. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.4>
23. Voytkovsky K.F. *Fundamentals of glaciology*. Moscow: Nauka Publ.; 1999. (In Russ.)
- Войтковский К.Ф. Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 256 с.
24. Leitchenkov G.L. Environmental and climate changes in Antarctica in the geological past. *Ice and Snow*. 2014;(4):107–116. (In Russ.)
- Лейченко Г.Л. Изменения климата и природной среды Антарктики в геологическом прошлом // Лед и снег. 2014. № 4. С. 107–116.
25. Ekaykin A.A., Tchikhatchev K.B., Veres A.N., Lipenkov V.Ya., Tebenkova N.A., Turkeev A.V. Vertical profile of snow-firn density in the vicinity of Vostok station, Central Antarctica. *Ice and Snow*. 2022;62(4):504–511. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2076673422040147>
- Экайкин А.А., Чихачев К.Б., Верес А.Н., Липенков В.Я., Тебенкова Н.А., Туркеев А.В. Профиль плотности снежно-фирновой толщи в районе станции Восток, Центральная Антарктида // Лед и снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 504–511.